



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Estudios de Postgrado

Maestría en Artes en Energía y Ambiente

**PROPUESTA DE REDUCCIÓN DE EMISIONES NOCIVAS UTILIZANDO MEJORADORES DE
OCTANAJE**

Ing. Boris Ivan Velázquez Fernández

Asesorado por el MA. Ing. José Antonio Rosal Chicas

Guatemala, marzo de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPUESTA DE REDUCCIÓN DE EMISIONES NOCIVAS UTILIZANDO MEJORADORES DE
OCTANAJE**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. BORIS IVAN VELÁZQUEZ FERNÁNDEZ
ASESORADO POR EL MA. ING. JOSÉ ANTONIO ROSAL CHICAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
MAESTRO EN ARTES EN ENERGÍA Y AMBIENTE

GUATEMALA, MARZO DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Ing. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Ing. Aurelia Anabela Cordova Estrada
DIRECTOR	Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
EXAMINADOR	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

PROPUESTA DE REDUCCIÓN DE EMISIONES NOCIVAS UTILIZANDO MEJORADORES DE OCTANAJE

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 18 de noviembre de 2017.


Ing. Boris Ivan Velázquez Fernández

DTG. 120.2021.

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **PROPUESTA DE REDUCCIÓN DE EMISIONES NOCIVAS UTILIZANDO MEJORADORES DE OCTANAJE**, presentado por el Ingeniero: **Boris Iván Velázquez Fernández**, estudiante de la **Maestría en Artes en Energía y Ambiente** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana

Guatemala, marzo de 2021.

AACE/asga



EEPFI-0403-2021

Guatemala, Marzo 2021

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y verificar la aprobación del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística al Trabajo de Graduación titulado: **"PROPUESTA DE REDUCCIÓN DE EMISIONES NOCIVAS UTILIZANDO MEJORADORES DE OCTANAJE"** presentado por el Ingeniero **Boris Iván Velázquez Fernández** quien se identifica con Carné **009712873** correspondiente al programa de **Maestría en Artes en Energía y Ambiente**; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Colf
Director



Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala



Guatemala, Marzo 2021

EEPI-0404-2021

Como Coordinador de la **Maestría en Artes en Energía y Ambiente** doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: "PROPUESTAS DE REDUCCIÓN DE EMISIONES NOCIVAS UTILIZANDO MEJORADORES DE OCTANAJE" presentado por el Ingeniero **Boris Iván Velázquez Fernández** quien se identifica con Carné **009712873**.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todas"

Mtro. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador de Maestría
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala



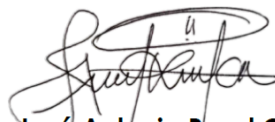
Guatemala, Marzo 2021

EEPM-0405-2021

En mi calidad como Asesor de la Ingeniero **Boris Iván Velázquez Fernández** quien se identifica con Carné **009712873** procedo a dar el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **"PROPUESTA DE REDUCCIÓN DE EMISIONES NOCIVAS UTILIZANDO MEJORADORES DE OCTANAJE"** quien se encuentra en el programa de **Maestría en Artes en Energía y Ambiente** en la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"



JOSÉ ANTONIO ROSAL
INGENIERO QUÍMICO INDUSTRIAL
MAESTRO EN ENERGÍA Y AMBIENTE
COLEGIADO No. 1837

M.A. José Antonio Rosal Chicas
Asesor

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Fuente infinita de gracia y virtud por brindarme la salud y los medios para desarrollarme.

Virgen María

Por su intercesión y auxilio en las circunstancias difíciles y amargas de mí existencia.

Mis padres

Luis Felipe Velásquez e Isabel Fernández por darme la vida y su apoyo desde mi infancia.

Mi familia

Por su amor fraterno.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser la casa de estudios, que me formo como profesional.
Facultad de Ingeniería	Por brindarme el conocimiento que me ha ayudó a transformar mi persona.
Ministerio de Energía y Minas	En especial, al Ing. José Francisco Pedroza por apoyarme en la ejecución de los ensayos de laboratorio.
Mí asesor	MA. Ing. José Antonio Rosal Chicas por su apoyo desde el inicio en la realización de esta tesis.
Los que colaboraron con su tiempo y dándome costos preferenciales en la realización de este trabajo	Muchas gracias.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XI
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO	XVII
INTRODUCCIÓN.....	XIX
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. La gasolina	1
1.2. Propiedades de la gasolina	1
1.3. Aditivos para la gasolina.....	3
1.4. Éteres como aditivos de combustibles	4
1.5. Etanol	6
1.6. Metanol.....	7
1.7. Isopropanol.....	9
1.8. Influencia de la calidad de la gasolina en las emisiones	9
1.9. Tendencias en las especificaciones de calidad de la gasolina	10
1.10. Principales emisiones producidas por la combustión de los combustibles	11
1.10.1. Monóxido de carbono (CO)	11
1.10.2. Hidrocarburos (HC).....	12
1.10.3. Óxidos nitrosos (NOx)	13

1.10.4.	Partículas en suspensión (TPS)	13
1.11.	Normalización de las emisiones en el mundo	14
1.12.	Legislaciones que intentaron regular las emisiones en Guatemala.....	15
1.13.	Contaminación del aire	17
1.13.1.	Contaminación natural.....	17
1.13.2.	Contaminación artificial	17
1.13.3.	Estándares de la calidad del aire	18
1.13.4.	Índices de la calidad del aire y materia particulada	20
2.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	21
2.1.	Aspectos generales.....	21
2.2.	Propiedades fisicoquímicas evaluadas en la gasolina	22
2.3.	Ensayos de combustión	24
2.3.1.	Procedimiento de medición de gases.....	25
2.3.2.	Comparativo de emisiones	26
3.	RESULTADOS.....	27
3.1.	Propiedades fisicoquímicas.....	27
3.2.	Ensayo de combustión	34
3.3.	Funcionamiento del sensor de oxígeno.....	36
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	41
4.1.	Octanaje	41
4.2.	Presión de vapor de Reid.....	41
4.3.	Corrosión de tira de cobre	42
4.4.	Curva de destilación.....	43

4.4.1.	Temperatura alcanzada al recuperar el 10 % en volumen.....	43
4.4.2.	Temperatura alcanzada al recuperar el 50 % en volumen.....	43
4.4.3.	Temperatura al recuperar el 90 % en volumen.....	44
4.4.4.	Temperatura alcanzada en el punto final de destilación.....	44
4.4.5.	Residuo de la curva de destilación	45
4.4.6.	Evaluación de las emisiones	45
4.4.7.	Funcionamiento del sensor de oxígeno	47
CONCLUSIONES		49
RECOMENDACIONES.....		51
REFERENCIAS.....		53

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Molécula de MTBE	5
2.	Comportamiento de los distintos tipos de contaminantes en función del valor Lambda.....	14
3.	Índice de octano de las distintas mezclas de gasolina y control	27
4.	Presión de vapor de Reid de las mezclas y el control.....	28
5.	Corrosión de tira de cobre de las mezclas y control.....	29
6.	Temperatura al recuperar el 10 % en volumen de la prueba curva de destilación	30
7.	Temperatura al recuperar el 50 % en volumen de la prueba curva de destilación	31
8.	Temperatura al recuperar el 90 % en volumen de la prueba curva de destilación	32
9.	Temperatura al punto final de la prueba curva de destilación	33
10.	Residuo de la prueba curva de destilación.....	34
11.	Emisiones a ralentí.....	35
12.	Emisiones a 2500 rpm.....	36
13.	Funcionamiento del sensor a ralentí con control.....	37
14.	Funcionamiento del sensor a 2500 rpm con control.....	37
15.	Funcionamiento del sensor a ralentí con mezcla de etanol.....	38
16.	Funcionamiento del sensor a 2500 rpm con mezcla de etanol	38
17.	Funcionamiento del sensor a ralentí con mezcla de metanol.....	39
18.	Funcionamiento del sensor a 2500 rpm con metanol.....	39
19.	Funcionamiento del sensor a ralentí con mezcla de isopropanol.....	40
20.	Funcionamiento del sensor a 2500 rpm con mezcla de isopropanol....	40

TABLAS

I.	Índices de octano de algunos aditivos de gasolina	4
II.	Propiedades del etanol, metanol e isopropanol	6
III.	Límites de contaminantes	19
IV.	Límites de contaminantes	20
V.	Límites de contaminantes	21
VI.	Comparación normal y sin sangría	22
VII.	Características fisicoquímicas evaluadas en la gasolina	22
VIII.	Características fisicoquímicas de la muestra control	23
IX.	Características del vehículo	24
X.	Emisiones de la gasolina control.....	26
XI.	Límites máximos y mínimos de emisiones que fueron regulados en Guatemala	26
XII.	Diferencias significativa de las distintas emisiones a ralentí	45
XIII.	Diferencias significativa de las distintas emisiones a 2500 rpm.....	46

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
CO ₂	Bióxido de carbono
HP	Caballos de fuerza
HC	Hidrocarburos no quemados
KW	Kilo watt
CO	Monóxido de carbono
MON	Número de octano de motor
RON	Número de octano de investigación
RVP	Presión de vapor de Reid
rpm	Revoluciones por minuto

GLOSARIO

Alcohol	Compuesto que tiene un grupo hidroxilo, -OH unido por medio de un enlace covalente a una cadena carbonada.
Alcohol primario	Alcohol con un grupo hidroxilo enlazado a un carbono el cual puede estar unido o no a un átomo de carbono.
Alcohol secundario	Alcohol con un grupo hidróxido (-OH) ubicado en un carbono el cual está unido a dos átomos de carbono.
Ciclo de Otto	Ciclo termodinámico consistente en admisión, compresión, fuerza y escape, en los motores de combustión interna provocado por chispa.
Densidad	Relación entre masa y volumen de una sustancia.
Etanol	Alcohol primario compuesto por dos átomos de carbono y un grupo hidroxilo.
Grupo hidroxilo	Grupo funcional formado por un átomo de oxígeno y uno de hidrogeno.
Isopropanol	Alcohol secundario compuesto por tres átomos de carbono y un grupo hidroxilo

Metanol	Alcohol primario compuesto por un átomo carbono y un grupo hidroxilo.
Punto de ebullición	Temperatura a la cual una sustancia pasa de estado líquido ha estado gaseoso.
Punto de fusión	Temperatura a la cual una sustancia pasa de estado sólido ha estado líquido.

RESUMEN

Con el objetivo de hacer una propuesta de reducción de emisiones utilizando mejoradores de octanaje, se presenta el estudio del uso una gasolina superior aditivada en un 10 % con distintos mejoradores de octanaje o alcoholes.

Para el desarrollo del estudio se realizó una caracterización fisicoquímica de la gasolina superior pura y las distintas mezclas ensayadas, se evaluó el índice de octano, la presión de vapor de reíd, la corrosión de tira de cobre y la curva de destilación. Estas mezclas de combustible fueron combustionadas en un motor afinado de cuatro tiempos para determinar la variación en las emisiones de bióxido de carbono, monóxido de carbono e hidrocarburos no quemados. Para ello se utilizó un medidor estacionario de gases y un scanner.

En el estudio se muestra una metodología para la evaluación de los gases de combustión en un motor de un vehículo comercial de cuatro tiempos que opera bajo el ciclo de Otto. Se establecieron los pasos necesarios para poner a punto un motor para evaluar sus respectivas emisiones

Se compararon las emisiones generadas por las distintas mezclas que estableció que los mejoradores de octanaje reducen las emisiones en un motor bien afinado.

Se concluye que la utilización de mejoradores de octanaje y el adecuado mantenimiento al vehículo es una opción técnicamente viable para reducir las emisiones de monóxido de carbono e hidrocarburos no quemados.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Guatemala no se han desarrollado suficientes estudios sobre los mejoradores de octanaje, lo cual ha impedido que estos sean considerados como una solución para reducir las emisiones nocivas que generan los vehículos.

Se considera que esta carencia de estudios sobre los mejoradores de octanaje es una de las causas de la excesiva contaminación ambiental generada por las emisiones vehiculares.

Para abordar el problema planteado, se presenta la interrogante principal ¿es posible reducir las emisiones nocivas utilizando mejoradores de octanaje en gasolina? Un análisis más profundo necesita establecer: ¿cuál es el procedimiento de precalificación del vehículo para hacer las pruebas gases de escape, con el fin de obtener datos confiables? A la vez requiere identificar si ¿cumplen las tres distintas mezclas de gasolina superior aditivada al 10 % con un etanol, metanol e isopropanol, con las especificaciones de calidad establecidas en el *Reglamento técnico centroamericano* para la gasolina superior RTCA 75.01.20:04? ¿cuál de las tres distintas mezclas de gasolina superior aditivada al 10 % con etanol, metanol e isopropanol es más eficiente en reducir emisiones de CO y HC en los gases de escape?

Continuar comercializando los actuales combustibles sin llevar a cabo estudios locales sobre los mejoradores de octanaje, implica perder la oportunidad de desarrollar nuevas oportunidades de negocio en el mercado de los combustibles y a largo plazo puede traer consigo el severo deterioro de la salud de los habitantes de la ciudad de Guatemala.

OBJETIVOS

General

Establecer los lineamientos técnicos para una propuesta de reducción de emisiones nocivas utilizando mejoradores de octanaje.

Específicos

- Determinar la conformidad con los parámetros de calidad establecidos por el Reglamento técnico centroamericano para la gasolina superior RTCA 75.01.20:04 de las tres distintas mezclas de gasolina superior aditivada con (etanol, metanol e isopropanol) al 10 %.
- Diseñar una metodología de evaluación de los gases de combustión en un vehículo comercial, con motor de combustión interna accionado por gasolina.
- Determinar cuál de las tres distintas mezclas de gasolina superior aditivadas con (etanol, metanol e isopropanol), genera la mayor reducción de emisiones de monóxido de carbono, hidrocarburos no quemados.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

La investigación realizada es de tipo cuantitativa descriptiva, comparando entre si los datos que se obtienen de las emisiones de la combustión de una gasolina superior reformulada al diez por ciento con etanol, metanol e isopropanol.

Actualmente, en Guatemala no existe ninguna ley que intente reducir las emisiones vehiculares o un plan para introducir aditivos mejoradores de octanaje los cuales reducen las emisiones; en años recientes la Asociación de combustibles renovables Guatemala, condujo un plan piloto para evaluar mezclas de gasolina y etanol en varias proporciones (5 %, 7 % y 10 %), con el objeto de determinar si existía alguna limitante técnica en utilizar estas mezclas. Los resultados mostraron que no existe ninguna limitante técnica para un vehículo convencional en utilizar hasta un 10 % de etanol.

Se realizó una caracterización de las propiedades fisicoquímicas de la gasolina superior utilizada y sus cuatro respectivas reformulaciones con etanol al 10 %, metanol al 10 % e isopropanol al 10 %; para determinar si cumplen con los requisitos de calidad establecidos en el Reglamento técnico centroamericano para la gasolina superior RTCA 75.01.20:04. Para ello las muestras de gasolina fueron evaluadas en los laboratorios técnicos del Ministerio de Energía y Minas.

Se realizó una evaluación y mantenimiento del vehículo en el cual se realizaron las pruebas del combustible las cuales consistieron en: re calibración de válvulas, verificación de compresiones de los cilindros del motor las cuales deben ser mayores a 120 psi, re calibración y limpieza de inyectores, verificación

por medio de scanner que el vehículo no reporta códigos de fallo, verificación del correcto funcionamiento del sensor de oxígeno por medio de scanner, verificación visual del sistema de escape del vehículo el cual no debe presentar fugas, cambio de bugías, aceite de motor, filtro de aceite de motor y filtro de aire y limpieza del depósito de combustible.

Para la evaluación de las emisiones vehiculares se utilizó un analizador de gases marca BEAR el cual determina las concentraciones en volumen de monóxido de carbono (CO) y bióxido de carbono (CO₂) así como partes por millón de hidrocarburos no combustionados (HC). Se realizaron tres mediciones por cada prueba tabulando el valor promedio obtenido.

A partir de los datos obtenidos tabulados se aplicó el diseño estadístico completamente al azar y luego un análisis de varianza (ANOVA) para un nivel de confianza del 95 %, el análisis de datos se llevó a cabo por medio del software Excel, esto con el fin de determinar si el mejorador de octanaje bajo prueba (etanol, metanol e isopropanol) presenta alguna diferencia significativa en cuanto a la reducción de emisiones vehiculares versus una gasolina superior pura.

INTRODUCCIÓN

Las gasolinas son un derivado del petróleo que se utiliza en los vehículos de combustión interna con ciclo de Otto, dichos motores para su buen funcionamiento y también para reducir la cantidad de emisiones generadas, necesitan de una gasolina formulada con mejoradores de octanaje y en Guatemala es escasa la investigación que se ha realizado en dicho tema.

. Por esta razón se investigó el efecto de distintos mejoradores de octanaje tales como el etanol, metanol e isopropanol en la reducción de las emisiones en un motor que funciona con el ciclo de Otto, con el objeto de establecer los porcentajes de reducción de emisiones alcanzadas con cada uno.

En el capítulo 1, se describen los conceptos básicos sobre: gasolina y sus aditivos, contaminación y emisiones generadas por los vehículos automotores y legislación pertinente. En el capítulo 2, se describe como se diseñó el experimento indicando variables, mezclas utilizadas, propiedades fisicoquímicas a evaluar en las mezclas y metodología. Para llevar a cabo este estudio se contará con un vehículo equipado con un motor que funciona utilizando el ciclo de Otto, el cual se precalificó para garantizar su óptimo funcionamiento

En el capítulo 3, se exponen los resultados a través de gráficas; estas, permitirán establecer que mejoradores de octanaje son más efectivos en la reducción de emisiones en una gasolina tipo superior comercializada en el país.

En el capítulo 4, se discuten los resultados obtenidos, basados en las observaciones y la teoría relacionada. Por último, se presentarán las conclusiones y recomendaciones pertinentes.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. La gasolina

La gasolina es uno de los derivados del petróleo con un punto de ebullición que va desde 100 hasta 400 grados Fahrenheit, la cual es obtenida por el refinamiento del petróleo el cual consiste en destilación atmosférica, craqueo y reformación catalíticos. Está compuesta de hidrocarburos parafinicos, olefinicos, naftenicos, aromáticos, compuestos oxigenados y aditivos (Parkash, 2010).

Las gasolinas dentro de sus múltiples componentes se encuentra benceno, aromáticos, olefinas. El benceno es precursor del cáncer en los seres humanos. Los aromáticos y las olefinas al quemarse en el proceso de combustión dan como resultado gases precursores de ozono (aldehídos y cetonas) (Parkash, 2010).

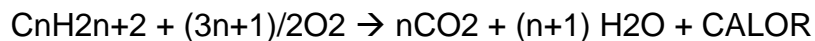
1.2. Propiedades de la gasolina

Entre las propiedades de la gasolina esta: número de octano que es una medida de la capacidad antidetonante, presión de vapor de Reid que es una medida de su volatilidad, destilación que es una medida de la temperatura y fracciones no volátiles y aditivos que son sustancias mejoradoras de algunas propiedades (antiespumantes, mejoradores del octanaje, antioxidante, detergente, entre otros) (Parkash, 2010).

Las emisiones vehiculares liberadas al ambiente a través del tubo de escape y tienen su origen en la combustión, la cual tiene lugar dentro de la cámara de combustión del motor, mediante la reacción de oxidación la energía

química almacenada en la gasolina es liberada en forma de calor y gases, los cuales llegan a convertirse en contaminantes para el ambiente (Klingberg, 1996).

El proceso químico que sucede en el motor para la oxidación de la gasolina en condiciones ideales se describe así:



La razón por la cual no se alcanzan estas condiciones es debido al hecho que, en el proceso de combustión, ocurre en uno de los ciclos del motor, origina que la reacción no alcance las condiciones de equilibrio y una no homogénea mezcla de gases aparece, provocando reacciones secundarias (Klingberg, 1996).

Teóricamente la combustión sería perfecta con una relación de aire combustible de 14.9 kilogramos de aire por 1 kilogramo de gasolina. La relación entre la calidad real del aire aspirado y la cantidad teórica aspirada se denomina factor Lambda, y se representa por el símbolo λ , se determina según la siguiente ecuación

$$\lambda = \text{volumen real de aire aspirado} / \text{volumen teórico requerido}$$

Un valor de Lambda mayor a 1 significa exceso de aire o mezcla pobre; un valor de Lambda menor a 1 significa exceso de combustible o mezcla rica (INTECAP, 2004).

Nuevas tecnologías están disponibles las cuales permiten acercarse más hacia una combustión ideal; sin embargo, aún existen limitantes para lograrlo por la tecnología existente y la composición del combustible utilizado, ya que la

gasolina no es una sustancia pura sino una mezcla de hidrocarburos (Gonzalez, 2010).

1.3. Aditivos para la gasolina

Los aditivos a las gasolinas juegan un papel importante, para mejorar sus características a fin de lograr las especificaciones de calidad exigidas. El uso de aditivo permite reducir las emisiones del motor en muchos casos. Los aditivos de las gasolinas se pueden clasificar de acuerdo con su propósito en los siguientes grupos:

- Aditivos que influyen la combustión
- Aditivos que protegen el sistema de combustible
- Aditivos mejoradores de la lubricidad
- Aditivos mejoradores de la estabilidad a la oxidación

Los aditivos mejoradores del octanaje mundialmente conocidos mundialmente son el tetraetilo de plomo (TEL) y el tetrametilo de plomo (TML). Los cuales fueron desplazados del mercado por la preocupación generalizada sobre los efectos sobre la salud del plomo. Otro grupo de aditivos mejoradores del octanaje son los compuestos oxigenados, principalmente los éteres y los alcoholes, los cuales son utilizados en la actualidad en las gasolinas sin plomo. Los principales éteres utilizados son:

- Metil terbutil butil éter (MTBE)
- Éter teramil metílico (TAME)
- Éter tert butil etílico (ETBE)

Los alcoholes más importantes en mezclas de gasolinas para mejorar el octanaje son los siguientes:

- Metanol
- Etanol
- Tert butanol
- Isopropanol
- Isobutanol

Uno de los únicos problemas encontrados al utilizar alcohol como aditivo mejorador del octanaje es el efecto adverso que puede causar en algunos materiales que componen el sistema de inyección (Sher, 1998).

Tabla I. **Índices de octano de algunos aditivos de gasolina**

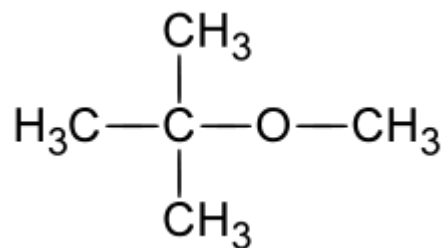
Compuesto	Índice de octano
Metanol	116
Etanol	112
MTBE	116
Benceno	106
Tolueno	118
P- Xileno	116

Fuente: Sher (1998). *Handbook of air pollution from internal combustion engine*.

1.4. **Éteres como aditivos de combustibles**

El metanol se ha usado para producir el aditivo oxigenado de la gasolina MTBE (Metil ter-butil éter) cuya estructura es:

Figura 1. **Molécula de MTBE**



Fuente: Sher (1998). *Handbook of air pollution from internal combustion engine*.

El MTBE cuyo índice de octano es 116 se utiliza en América del Norte y Europa mezclado con la gasolina sin plomo (hasta un 15 %) con el fin de incrementar el índice de octano y también para reducir la contaminación del aire por monóxido de carbono e hidrocarburos no quemados, al igual que el alcohol es un combustible oxigenado y genera menos monóxido de carbono la combustión. Las ventajas de este aditivo en comparación con el alcohol es su mayor índice de octano y menor volatilidad, pero su combustión también puede producir más aldehídos y otros contaminantes oxigenados que producirían los alcoholes. Este aditivo ha generado controversia por su olor penetrante y que puede contaminar el agua subterránea, lo cual ya ha ocurrido en algunos lugares de Estados Unidos. La presencia de este aditivo en agua subterránea ocurre cuando existen fugas en tanques subterráneos y derrames de gasolina.

Este aditivo es muy soluble en agua y muy resistente a la degradación biológica, por esta razón este aditivo ha sido sustituido en varios estados de Estados Unidos por alcohol (Bair, 2012).

1.5. Etanol

El etanol es un compuesto químico que se presenta como un líquido incoloro e inflamable cuya fórmula química es $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$ y puede ser utilizado en forma pura o en combinaciones con gasolina, a la mezcla de gasolina y alcohol se le denomina gasohol (Bair, 2001).

Tabla II. **Propiedades del etanol, metanol e isopropanol**

Propiedad	Metanol	Etanol	Isopropanol
Punto de fusión (°C)	-94	-117	-89
Punto de ebullición (°C)	65	78	82
Densidad (g/ml)	0.79	0.79	0.78
AH combustión (KJ/g)	-22.7	-29.7	-33.38
Estado de agregación	Líquido	Líquido	Líquido
Apariencia	Incoloro	Incoloro	Incoloro

Fuente: Bair (2001). *Química ambiental*.

Los alcoholes pueden ser utilizados en forma pura, o como componentes de una disolución de gasolina. A estos se les designa con una letra M para metanol y una letra E para etanol en combinación de un subíndice que indica el porcentaje de alcohol líquido.

Actualmente en Estados Unidos, el gasohol se comercializa para el uso vehicular en una proporción de 10 % de etanol y 90 % de gasolina (E10). La gasolina y el alcohol son miscibles el uno en el otro en cualquier rango. Actualmente en Brasil se utiliza E100. Debido a la baja presión de vapor del

alcohol en climas fríos se presentan problemas con el encendido, por lo que en dichos climas no se recomienda ir más allá de una mezcla E85 (Bair, 2001).

En Brasil, se intensificó el empleo del alcohol etílico como combustible automotor mezclándolo con gasolina o utilizándolo en su estado puro. Actualmente 18 millones de automóviles en Brasil, es decir la totalidad de la flota de vehículos livianos utilizan alcohol, 3 millones de unidades consumen alcohol hidratado puro y 15 millones consumen una mezcla de alcohol/gasolina con 25 % de alcohol anhidro. Hace muchos años que ya no existen automóviles que utilicen gasolina pura en Brasil. De acuerdo con la experiencia brasileña para uso en mezclas con hasta 10 % de etanol no se requieren cambios o ajustes en los motores y vehículos (Horta, 2004).

Los beneficios ambientales que se obtiene al utilizar el etanol como carburante son: Las mezclas de gasolina con etanol reducen dramáticamente las emisiones de los hidrocarburos, reducción de las emisiones de monóxido de carbono, gases con efecto invernadero, reducción en la formación de smog y mejora en la combustión al tener una quema limpia y completa (Asociación de combustibles renovables Guatemala, s.f)

1.6. Metanol

En 1930, el metanol sintético se introdujo en los Estados Unidos aproximadamente a la mitad del precio del alcohol de madera y se consideró como posible sustituto de la gasolina. Actualmente, todo el metanol se obtiene a partir de hacer reaccionar bióxido de carbono e hidrogeno a presiones de 50 a 100 atmosferas y a temperaturas de 220 a 270 grados Celsius y presencia de catalizadores de cobre y óxido de zinc.



Parte de las grandes emisiones de bióxido de carbono que se emiten anualmente a la atmosfera, por las industrias podría utilizarse como gas de síntesis para este proceso, el metanol producido a través de este mecanismo podría considerarse como un combustible renovable siempre y cuando no se utilicen combustibles fósiles para producir el hidrogeno necesario (Kirk, 1998).

Aunque el metanol en sí mismo puede considerarse un combustible para vehículos, existen reacciones químicas mediante las cuales es posible producir gasolina a partir de metanol, gas natural y carbón, ninguno de estos procesos es lo suficientemente eficiente como para competir con la gasolina producida a partir de la destilación del petróleo (Baird, 2001).

El metanol se diluye en las gasolinas de manera satisfactoria únicamente en un 15 % esto constituye una desventaja en su uso, la presencia de agua en estas mezclas origina una separación de las fases. Otro de los inconvenientes del metanol es su toxicidad, la exposición prolongada a él puede llegar a dañar hígado y riñones, producir dermatitis y ocasionar ceguera (Kirk, 1998).

Otro punto para considerar al utilizar metanol en vehículos convencionales, es que este reacciona corroyendo algunos componentes del motor y del tanque de combustible. A pesar de estos inconvenientes este alcohol es utilizado actualmente en vehículos de carreras por su alto octanaje, otra ventaja consiste es la menor cantidad de emisiones de monóxido de carbono, alquenos, compuestos aromáticos y partículas, estas ventajas tienen el inconveniente que los alcoholes producen aldehídos como subproductos de la combustión. El metanol al ser quemado por el motor produce menos emisiones de NOx que el etanol y la gasolina pura (Bair, 2001).

1.7. Isopropanol

Es un alcohol secundario que se presenta en estado líquido, volátil, incoloro, cuyos vapores son más pesados que el aire, cuya fórmula molecular es $\text{CH}_3\text{-CHOH-CH}_3$, en la cual uno de los hidrógenos del átomo central de carbono es sustituido por un grupo hidroxilo (OH) (Bair, 2001).

1.8. Influencia de la calidad de la gasolina en las emisiones

Esta claramente demostrado que existe una correlación entre el rendimiento de la gasolina y las emisiones generadas y también se ha demostrado que las emisiones generadas dependen también de la tecnología con que este equipado el vehículo (convertidores catalíticos, válvulas de recirculación de gases) (Sher, 1998).

El añadir compuestos oxigenados produce una reducción de emisiones de monóxido de carbono e hidrocarburos, pero incrementa la emisión de aldehídos, especialmente el formaldehído el cual es conocido como cancerígeno y con una elevada actividad fotoquímica. La reducción de aromáticos permite una reducción de monóxido de carbono, hidrocarburos no quemados y benceno, pero esto tiene un efecto adverso en la emisión de NO_x . Existe una correlación directa entre el contenido de aromáticos en las gasolinas y la generación de emisiones de hidrocarburos aromáticos policíclicos (PHA), los cuales son conocidos como cancerígenos y promotores de mutaciones genéticas. La reducción del contenido de benceno en las gasolinas lleva consigo una reducción de este en las emisiones y la reducción de olefinas disminuye las emisiones de alquenos especialmente del 1,3-butadieno. La reducción de la presión de vapor en las gasolinas permite una reducción de las emisiones de hidrocarburos por efecto haber una menor evaporación de estos (Sher, 1998).

1.9. Tendencias en las especificaciones de calidad de la gasolina

Las especificaciones de calidad de las gasolinas actualmente están orientadas a reducir el impacto sobre el medio ambiente, para lograr esto existen las siguientes tendencias:

- Reducir las trazas de plomo en las gasolinas que se denominan sin plomo a valores de 0.013 y 0.005 gramos por litro.
- Añadir aditivos oxigenados a las gasolinas, para reducir las emisiones de monóxido de carbono e hidrocarburos no quemados.
- Reducir el contenido de aromáticos, por la necesidad de incrementar el octanaje las gasolinas sin plomo generalmente tienen altas concentraciones de aromáticos, pero el uso de estos trae consigo el incremento de emisiones que son consideradas cancerígenas, razón por la cual existe una tendencia a limitar o reducir su uso. En algunos estados de Estados Unidos se tiene un valor máximo permisible de 25 % en volumen.
- Reducción del contenido de benceno, este es el más ligero de los aromáticos. En Europa se limita el benceno a no más del 5 % en volumen.
- Reducción del contenido de olefinas. En el estado de california se limita está a no más de 5 % en volumen (Sher, 1998).

1.10. Principales emisiones producidas por la combustión de los combustibles

Los gases más importantes producto de las emisiones son los siguientes: monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), óxidos nitrosos (NO_x), partículas en suspensión (TPS) y dióxido de azufre (SO₂) (Aroche, 2013).

1.10.1. Monóxido de carbono (CO)

Es un gas producido por la combustión incompleta del combustible, debido al insuficiente suministro de oxígeno a la cámara de combustión y se utiliza como parámetro para determinar si existe una mezcla rica o pobre en aire. Si la mezcla aire – combustible se enriquece, es decir hay más combustible del necesario en relación con el oxígeno disponible, la cantidad de emisiones de CO se incrementará, si la cantidad de combustible se empobrece en relación al oxígeno disponible las emisiones de CO disminuirán hasta llegar a un mínimo, pero nunca llegarán a ser cero (Intecap, 2004).

El monóxido de carbono se encuentra presente de forma natural en la naturaleza y a pesar de ello se considera una sustancia tóxica, dado que provoca asfixia ya que desplaza el oxígeno unido a la hemoglobina. La hemoglobina es el compuesto de la sangre que transporta el oxígeno dentro del cuerpo formando con el oxígeno la oxihemoglobina (HbO₂), la hemoglobina al combinarse con el monóxido forma el carboxihemoglobina (HbCO), reacción irreversible por lo que el monóxido se une firmemente a la hemoglobina, evitando el transporte de oxígeno (Dickson, 1983).

Altas concentraciones de monóxido afectan la percepción, capacidad de pensar, deterioro del juicio, fatiga, visión borrosa y disminución de los reflejos.

Concentraciones por encima de 750 ppm producen pérdida de conciencia y la muerte (Spiro, 2005).

1.10.2. Hidrocarburos (HC)

Denominado el hidrocarburo crudo o combustible no quemado y lo constituyen los hidrocarburos incorporados al aire por la evaporación del combustible generado dentro del tanque del vehículo y en el circuito por el cual circula el combustible antes de llegar a la cámara de combustión; también, está conformado por los hidrocarburos que no se queman durante la etapa de la combustión y son posteriormente liberados al ambiente por el tubo de escape (Dickson, 1983).

En una combustión perfecta se producirá únicamente bióxido de carbono y agua, estas condiciones nunca se alcanzan dentro de la cámara de combustión por lo que se generan varios compuestos entre ellos hidrocarburos no quemados. En la medida que se alcance esta idealidad se reducirán los hidrocarburos a un valor mínimo. En mezclas ricas de combustible aumentara la presencia de hidrocarburos en los gases de escape, así como en mezclas extremadamente pobres, esto último porque existe una lenta propagación de la llama dentro del cilindro, con el resultado que el combustible escapara de la cámara de combustión antes de ser quemado (Klingenberg, 1996).

Los efectos en el ser humano al ser expuesto a estos contaminantes provocan irritación del tracto respiratorio, irritación de los ojos, cansancio y una tendencia a toser. Los hidrocarburos no saturados y aromáticos tienen mayor toxicidad (Dickson, 1983).

1.10.3. Óxidos nitrosos (NOx)

Hay diferentes compuestos moleculares formados por el nitrógeno (N) y el oxígeno (O), monóxido de nitrógeno (NO) y dióxido de nitrógeno (NO₂) estos son llamados óxidos de nitrógeno y se expresan por conveniencia como NO_x. El monóxido de nitrógeno es un gas incoloro e inodoro y el dióxido de nitrógeno es un gas café, con un olor penetrante y asfixiante. El 95 % de nitrógeno encontrado en los gases de escape es monóxido de nitrógeno (NO) que se forma en la cámara de combustión. El monóxido de nitrógeno se combina con el oxígeno en la atmosfera para formar dióxido de nitrógeno (NO₂). A altas temperaturas arriba de 1500 grados Celsius y con una alta concentración de oxígeno hace que el nitrógeno reaccione con el oxígeno para formar NO_x (Intecap, 2004).

También puede ocurrir que el NO_x se forme durante una combustión incompleta como en los casos de HC y CO porque solo así la temperatura es suficientemente alta para soportar la reacción química que se forma. Si la temperatura no excede los 1500 grados Celsius el nitrógeno y el oxígeno moleculares sobrantes de la combustión saldrán del sistema de escape sin combinarse para formar NO_x (IntecaP, 2004).

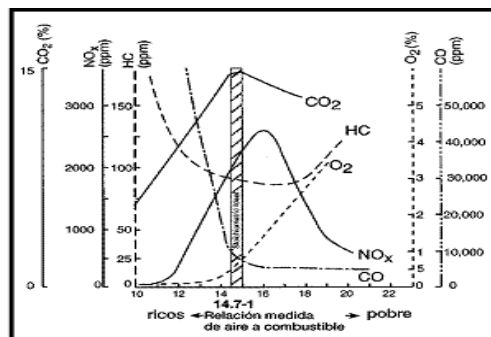
Entre los efectos a la salud a concentraciones de hasta 13 ppm provoca irritación de nariz, garganta y ojos y a concentraciones de hasta 25 ppm produce congestión y enfermedades respiratorias, a concentraciones de 100 a 1000 ppm puede causar la muerte incluso tras una breve exposición (Dickson, 1983).

1.10.4. Partículas en suspensión (TPS)

Durante el proceso de combustión se forman moléculas de carbón. Estas moléculas se combinan entre sí, formando cadenas más grandes, las cuales

forman el hollín, el cual al salir por el tubo de escape, absorbe otros contaminantes tales como los hidrocarburos crudos (HC), sulfatos, entre otros, que constituyen las partículas en suspensión, las cuales si son menores que 0.5 milímetros pueden ser absorbidas por seres humanos ocasionando daños en los pulmones. Las partículas mayores a $2\ \mu$ son menos dañinas, pero afectan el tracto respiratorio. A las partículas de un diámetro menor o igual a 10 micrones se les denominan PM10 (Intecap, 2004).

Figura 2. **Comportamiento de los distintos tipos de contaminantes en función del valor Lambda**



Fuente: INTECAP (2004). *Control de emisión de gases en motores a gasolina.*

1.11. Normalización de las emisiones en el mundo

El primer indicio de contaminación, en el ámbito mundial, fue la aparición del smog fotoquímico en 1943, a raíz de la rápida urbanización de los Ángeles en los Estados Unidos. La universidad de California determinó que el smog fotoquímico era producido por el efecto de los rayos solares en los gases de escape de los vehículos automotores.

En 1960 en la ciudad de Los Ángeles, California se estableció la primera regulación de emisiones de monóxido de carbono e hidrocarburos crudos (HC) emitidos por los vehículos automotores. En 1968 el gobierno de los Estados Unidos estableció una ley federal de control de emisiones de monóxido de carbono e hidrocarburos crudos (HC) para toda la nación. En 1970 debido a la gestión del Senador Edmun Muskie, se establecieron los límites máximo-permisibles para la emisión de monóxido de carbono, hidrocarburos crudos (HC) y óxidos de nitrógeno (NOx). A partir de entonces leyes similares se ha aprobado en Japón, Europa y otros países del mundo (Intecap, 2004).

1.12. Legislaciones que intentaron regular las emisiones en Guatemala

A la fecha no existe ninguna regulación vigente en cuanto a regular las emisiones y la última ley sobre la materia fue derogada en el año de 1998, a través del Decreto 930-98. A continuación, se mencionan los distintos intentos por legislar las emisiones vehiculares en Guatemala.

La ley de humo negro: fijaba un plazo para el ajuste de los motores de los vehículos).

Acuerdo Ministerial OM-051-91: prohibía la importación y consumo de gasolina con plomo.

Decreto No. 20-92: establecía el uso obligatorio de Catalizadores.

Decreto No. 82-97: este derogo el decreto que establecía el uso obligatorio de catalizador en el tubo de escape.

Acuerdo Gubernativo No.14-97: creó un reglamento para el control de emisiones de los vehículos automotores.

Reglamento de tránsito, Acuerdo Gubernativo No. 273-98: establece en su artículo 42, que la regulación de emisión de gases, se regirá por normas especiales.

Acuerdo Gubernativo No. 930-98: este derogo el reglamento para el control de emisiones de los vehículos automotores.

El Acuerdo Gubernativo No.14-97 Reglamento para el control de emisiones de los vehículos automotores, que intentaba regular las emisiones, establecía dos niveles según la fecha de ingreso del vehículo al país. Los parámetros para los vehículos ingresados al país antes del primero de enero de 1985:

- Monóxido de carbono: no más de 4.5 % del volumen total de gases
- Hidrocarburos no quemados: no más de 600 partes por millón
- Bióxido de carbono: por lo menos de 10.5 % volumen total de gases

Los parámetros para los vehículos ingresados al país a partir del primero de enero de 1995:

- Monóxido de carbono: no más de 5.0 % del volumen total de gases
- Hidrocarburos no quemados: no más de 125 partes por millón
- Bióxido de carbono: por lo menos de 12 % volumen total de gases

Este reglamento presentó varias debilidades: efecto retroactivo con parámetros adversos para vehículos rodados de modelos anteriores a la fecha de ingreso e infracciones y sanciones incoherentes con la realidad económica de la población; por lo tanto, se readecuó este reglamento a través del Acuerdo Gubernativo No. 273-98 (Oliva, 2008).

1.13. Contaminación del aire

Toda alteración en la pureza del aire del aire repercute en la salud o bienestar de los seres vivos. Esta alteración es lo que se denomina contaminación. Se considera como contaminación cualquier modificación en la composición del aire puro, en otras ocasiones la definición se basa en la nocividad de las sustancias sobre la salud del hombre, animales y plantas (Ortuño, 1994).

La alteración de la composición del aire tiene dos orígenes: natural y artificial.

1.13.1. Contaminación natural

Tiene su origen por causas muy diversas tales como viento, fuegos, nieblas, meteoritos, polen, vida animal, actividad volcánica, entre otros; esta tiene un carácter inevitable y la naturaleza misma restaura el equilibrio (Ortuño, 1994).

1.13.2. Contaminación artificial

Es provocada por la actividad humana, en los procesos de combustión, industria, tránsito vehicular y toda aquella actividad desarrollada por el hombre. La civilización moderna es una fuente de generación de contaminantes y por lo

tanto resulta tóxica para el medio ambiente. A medida que crecen las poblaciones y aumenta la industrialización, la naturaleza es cada vez más vulnerable y le resulta hacer frente a esta contaminación (Ortuño, 1994).

El consumo progresivo no puede mantenerse, tanto por el empobrecimiento del planeta de materias primas como por los efectos ambientales de acumulación de residuos, los cuales la naturaleza no puede digerir al ritmo creciente que se forzada a recibirlos (Ortuño, 1994).

El mayor origen de la contaminación del aire actualmente reside en las emisiones de los vehículos más que en las producidas por las fábricas o termoeléctricas (Cann, 2012).

El signo más evidente de la contaminación del aire por los vehículos es el humo negro que emiten los tubos de escape de camiones y autobuses. Este es más común en los países subdesarrollados, dado que en los países desarrollados la contaminación vehicular esta legislada. Se ha notado que en países emergentes a medida que crece su población y la densidad vehicular, la contaminación del aire ha empeorado severamente. Se ha notado que no se aplican controles sobre las emisiones hasta que un país alcanza un nivel de vida relativamente alto (Cann, 2012).

1.13.3. Estándares de la calidad del aire

En la tabla siguiente se da una lista de los valores límites de calidad del aire por ley en distintos países, correspondientes a los contaminantes atmosféricos más importantes. Los diferentes contaminantes corresponden diferentes valores, debido al tiempo de exposición a una concentración.

Tabla III. Límites de contaminantes

Gas	OMS (volumen/volumen)	EE.UU (volumen/volumen)	Canadá (volumen/volumen)	EU (volumen/volumen)	Australia, (volumen/volumen)
Ozono, O ₃ 8hrs	0.051	0.075	-----	0.061	0.08 en 4h
CO 8 hrs	---	9	13	9	9
NO ₂ 1 hr	0.11	0.10	0.21	0.11	0.12
SO ₂ 1 h	0.19 en 10 min	0.075	0.33	0.13	0.20

Fuente: Bair (2001). *Química ambiental*.

El control durante los últimos cincuenta años de los niveles de monóxido de carbono en las zonas urbanas en los países desarrollados ha sido uno de los mayores éxitos conseguidos. Estas reducciones se han logrado al uso de convertidores catalíticos en los vehículos y la introducción de aditivos oxigenantes a las gasolinas (Cann, 2012).

En el pasado los límites de emisión solo se aplicaban a los vehículos de transporte, a partir del año 2004 en los Estados Unidos se aplican normativas a los vehículos de todo uso con motor de gasolina, los cuales son cerca del 50 % de todas las compras de vehículos. Las motocicletas y los taxis de tres ruedas denominados tuk tuk muy difundidos en Asia funcionan con gasolina y sus emisiones de monóxido de carbono e hidrocarburos no quemados contribuyen significativamente a la contaminación del aire (Cann, 2012).

1.13.4. Índices de la calidad del aire y materia particulada

Al Controlar la calidad del aire, la medida más habitual para expresar la concentración de partículas en suspensión es el índice PM o cantidad de materia particulada presente en un volumen dado. Las unidades usuales son los microgramos de materia particulada por metro cubico (μgm^{-3}). En Estados Unidos y Canadá se controlan las PM₁₀, que es la concentración de las partículas que tiene un diámetro menos de 10 μm , estas partículas se clasifican como inhalables, ya que pueden respirarse y penetrar hasta los pulmones, su valor típico en un área urbana es de 20 a 30 μgm^{-3} . En el pasado se publicaban datos de valores de TPS que es la concentración de todas las partículas suspendidas en el aire. A nivel legislativo muchos países utilizan el PM_{2.5}, que corresponde tan solo las partículas finas (Cann, 2012).

Tabla IV. Límites de contaminantes

Organización o país	PM _{2.5} por 24 h	PM _{2.5} anual	PM ₁₀ 24 horas	PM ₁₀ anual
OMS	25	10	50	20
EE.UU.	35	15	150	
Canadá	30	-----	-----	-----
EU	-----	25	50	40

Fuente: Bair (2001). *Química ambiental*.

Globalmente, la contaminación atmosférica por partículas es un problema grave, en especial en los países subdesarrollados, a la fecha muy pocas ciudades que se acerquen al estándar de la OMS, dado al continuo aumento del número de vehículos y a la falta de controles de emisión (Cann, 2012).

2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. Aspectos generales

Para formular la mezcla de gasolina superior con los distintos mejoradores de octanaje se consideró lo legislado por el Acuerdo Ministerial 303-2018 establecido por el Ministerio de Energía y Minas el cual establece que para la gasolina superior y regular la cantidad de alcohol etílico anhidro no debe exceder de un 10 % en volumen; por lo anterior se decidió utilizar este porcentaje como base del presente estudio. Se definieron los siguientes parámetros:

Tabla V. Límites de contaminantes

Vehículos	(1) vehículo de motor de cuatro tiempos
Mejoradores de octanaje	Etanol anhidro con un grado alcohólico del 99.0 %.
	Metanol con un grado alcohólico de pureza de 99.95 %.
	Isopropanol con un grado alcohólico del 99.67 %.
Tipo de gasolina	Gasolina Superior, con número de octano de investigación (RON) de 95.
Concentración del mejorador de octanaje	10 % en volumen

Fuente: elaboración propia.

Se formularon 4 distintas mezclas más un control codificado de la forma siguiente:

Tabla VI. **Comparación normal y sin sangría**

Código de gasolinas reformulada	Cantidad de gasolina, concentración	Mejorador de octanaje, concentración
Control	Gasolina superior 100 %	
Etanol	Gasolina superior 90 % en volumen	Etanol, anhidro 10 % en volumen
Metanol	Gasolina superior 90 % en volumen	Metanol, 10 % en volumen
Isopropanol	Gasolina superior 90 % en volumen	Isopropanol 10 % en volumen

Fuente: elaboración propia.

2.2. **Propiedades fisicoquímicas evaluadas en la gasolina**

Las siguientes características fisicoquímicas fueron las evaluadas en las mezclas de gasolina aditivada con alcohol y el control.

Tabla VII. **Características fisicoquímicas evaluadas en la gasolina**

Característica	Método de análisis
Color	Visual
Corrosión tira de cobre 3 horas a 50oC	ASTM D-130
Presión de vapor de Reid, 37.8oC, Kpa	ASTM D-323
Número de octano de investigación, RON	Petrospec
Número de octano de motor, MON	Petrospec
Índice de octano, (RON+MON)/2	Petrospec
Densidad, 15°C, Kg/m ³	ASTM D-1298
Oxígeno total, % masa	ASTM D-5845
Benceno, % volumen	ASTM D-6277
Olefinas, % volumen	Petrospec
Saturados, % volumen	Petrospec

Continuación de la tabla VII.

Aromáticos totales, % volumen	Petrospec
Destilación	ASTM D-86

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se presenta los resultados para la muestra control:

Tabla VIII. **Características fisicoquímicas de la muestra control**

Característica		Especificación según legislación guatemalteca	Resultado
Color		Reportar	Rojo
Corrosión tira de cobre 3 horas a 50°C		Máximo No. 1	1
Presión de vapor de Reid, 37.8°C, Kpa		Máximo 69	57
Número de octano de investigación, RON		Mínimo 95	95
Número de octano de motor, MON		Reportar	84.2
Índice de octano, (RON+MON)/2		Mínimo 89	89.6
Densidad, 15°C, Kg/m ³		Reportar	761
Destilación a presión atmosférica en base evaporado, en grados Celsius	10 % volumen recuperado	Máximo 65	57
	50 % volumen recuperado	Rango 77 – 121	97
	905 de volumen recuperado	Máximo 190	151
	Punto final	Máximo 225	187
	Residuo	Porcentaje	1.0

Fuente: elaboración propia.

2.3. Ensayos de combustión

Para realizar las pruebas de emisión de gases se utilizó un vehículo, el cual tiene las siguientes características:

Tabla IX. Características del vehículo

Característica	Capacidad
Marca	Mitubishi
Línea	Lancer GL
Modelo	2004
Fabricado	Japón
Numero de cilindros	4
Válvulas por cilindro	3
Ratio de compresión	9.5:1
Potencia máxima	75 Hp (55Kw)
Máximo toque	108 Nm
Centímetros cúbicos de motor	1298
Máxima potencia @ rpm	6000 rpm
Máximo toque @ rpm	3000 rpm
Sistema de gasolina	Inyección multipunto
Turbo	No
Convertidor catalítico de tres vías	Si
Válvula EGR	No

Fuente: elaboración propia.

La selección del vehículo se realizó con base en la tecnología que los distribuidores de vehículos nuevos importan al país. Posterior a la selección del vehículo, se ajustó a las especificaciones del fabricante para evitar que esta condición afectara los resultados. Se realizó lo siguiente:

- Cambio de aceite de motor utilizándose un galón.
- Cambio de filtro de aire y aceite de motor.

- Uso de bujías de la marca NGK iridium ix, calibradas de fábrica a 1.1 mm.
- Calibración de válvulas.
- Calibración de inyectores.
- Revisión y cambio de sensor de oxígeno ubicado en el sistema de escape del vehículo.
- Revisión de funcionamiento de sensores por medio de un scanner marca Launch X-431 dagun III.
- Revisión de fugas en el sistema de escape.
- Revisión visual de fugas de aceite en el motor.
- Revisión de compresiones en los cilindros del motor.
- Prueba de fugas en los cilindros del motor.

2.3.1. Procedimiento de medición de gases

Para medir los gases en el vehículo accionado a gasolina, se deben seguir los pasos siguientes:

- Arranque el motor y permita que tanto el motor como catalizador lleguen a su temperatura de operación, 91 y 300 grados Celsius respectivamente para el vehículo evaluado.
- Revise el color de las emisiones, si hay presencia de humo azul no realice la medición, hasta corregir la causa.
- Conectar el equipo de emisión de gases al vehículo según procedimiento del equipo.
- Verificar que el aire acondicionado este apagado y la palanca de velocidades en neutro.

- Introduzca la sonda por lo menos 30 centímetros en el tubo de escape.
- Realizar dos pruebas, una a marcha lenta o ralentí y la otra a 2500 revoluciones aproximadamente, en ambas tomar lecturas de CO, CO₂ y HC, hasta que los valores estabilicen

A continuación, se presentan los valores obtenidos para la muestra control:

Tabla X. **Emisiones de la gasolina control**

Gases de escape	Monóxido de carbono, % volumen	Bióxido de carbono, % en volumen	Hidrocarburos, ppm
Ralentí	0.30	12.4	124
2500 rpm	0.22	13.0	0

Fuente: elaboración propia.

2.3.2. Comparativo de emisiones

En Guatemala, el Acuerdo Gubernativo 14-97 establecía que los vehículos de modelos posteriores al año 1995 debían cumplir con los siguientes parámetros:

Tabla XI. **Límites máximos y mínimos de emisiones que fueron regulados en Guatemala**

Monóxido de carbono, % volumen	Bióxido de carbono, % volumen	Hidrocarburos, ppm
Menor o igual 0.5	Mayor o igual que 12.0	Menor o igual que 125

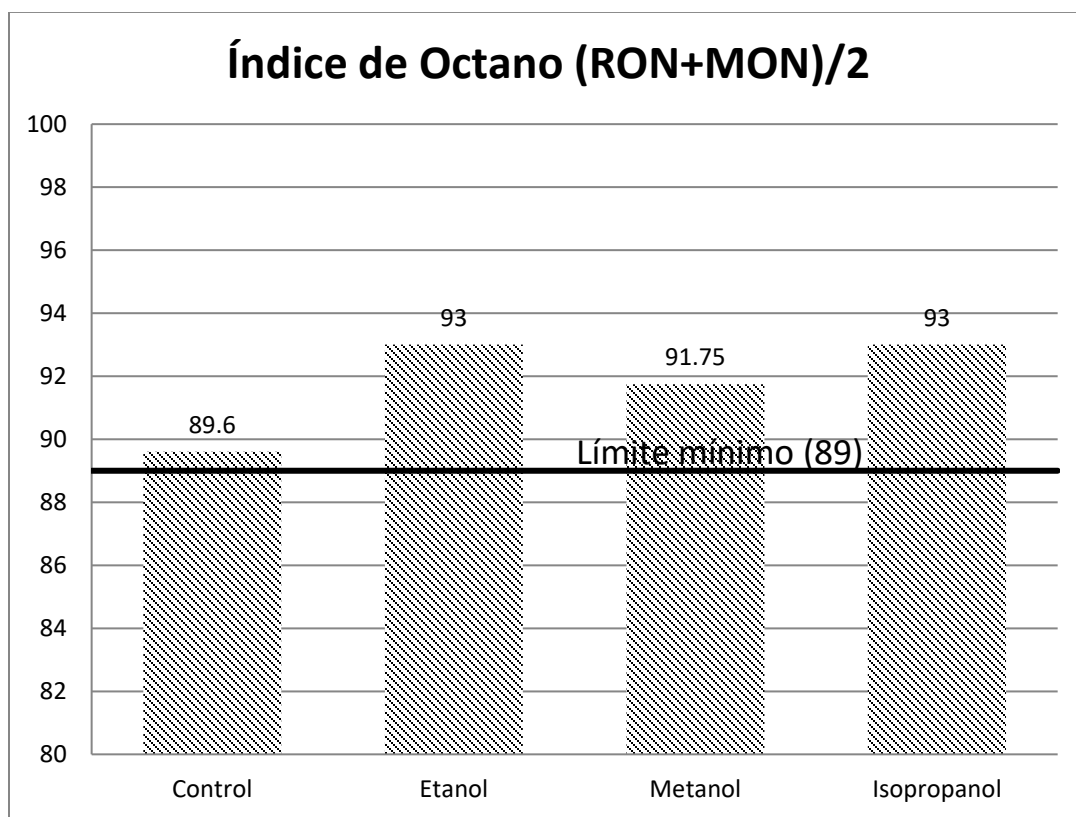
Fuente: elaboración propia.

3. RESULTADOS

3.1. Propiedades fisicoquímicas

Las siguientes gráficas corresponden a las propiedades fisicoquímicas de la gasolina superior y sus distintas mezclas con los mejoradores de octanaje

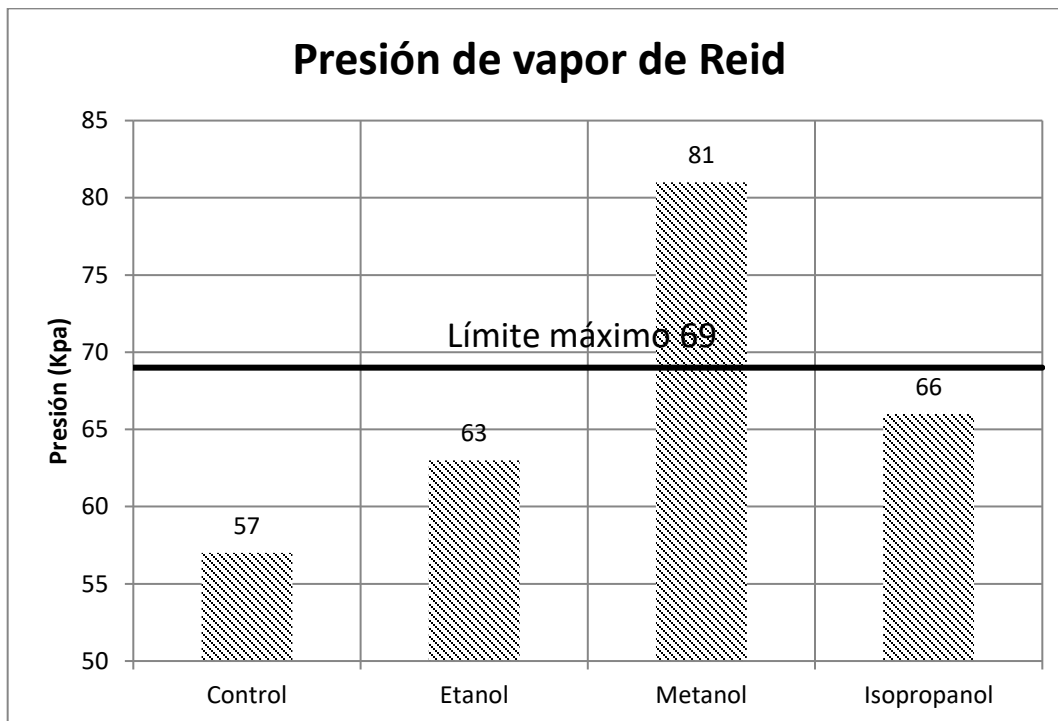
Figura 3. Índice de octano de las distintas mezclas de gasolina y control



Fuente: elaboración propia.

Comportamiento de la presión de vapor Reid de la muestra control y las mezclas al 10 % en volumen de etanol, metanol e isopropanol.

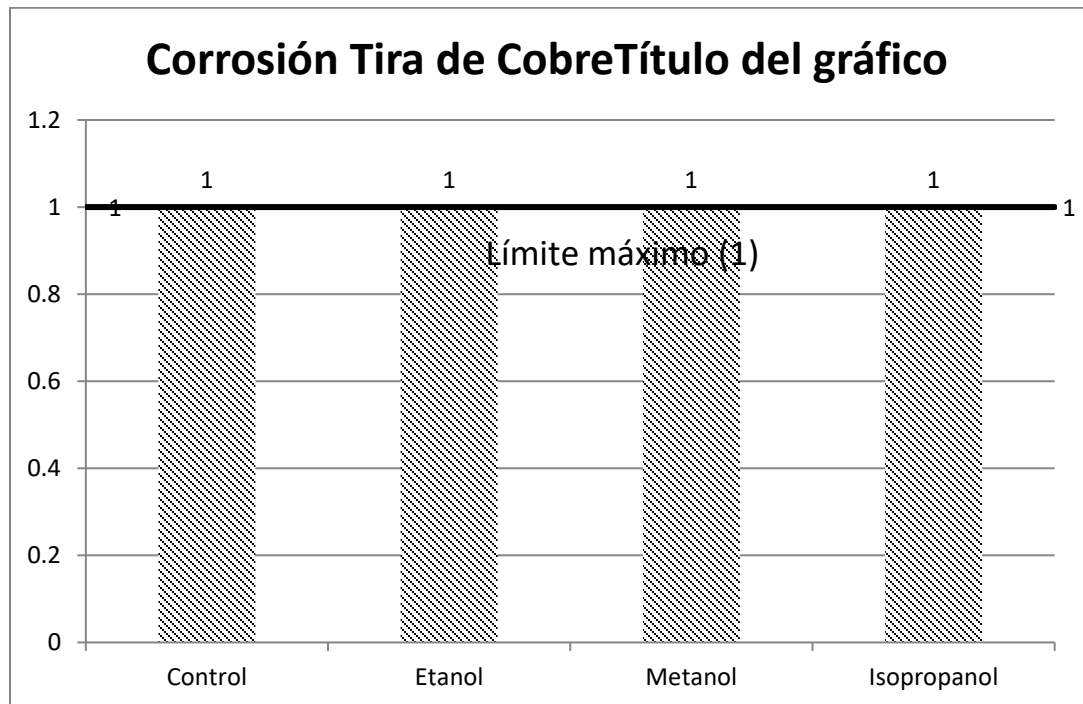
Figura 4. **Presión de vapor de Reid de las mezclas y el control**



Fuente: elaboración propia.

Comportamiento de la prueba corrosión de tira de cobre de la muestra control y las mezclas al 10 % en volumen de etanol, metanol e isopropanol.

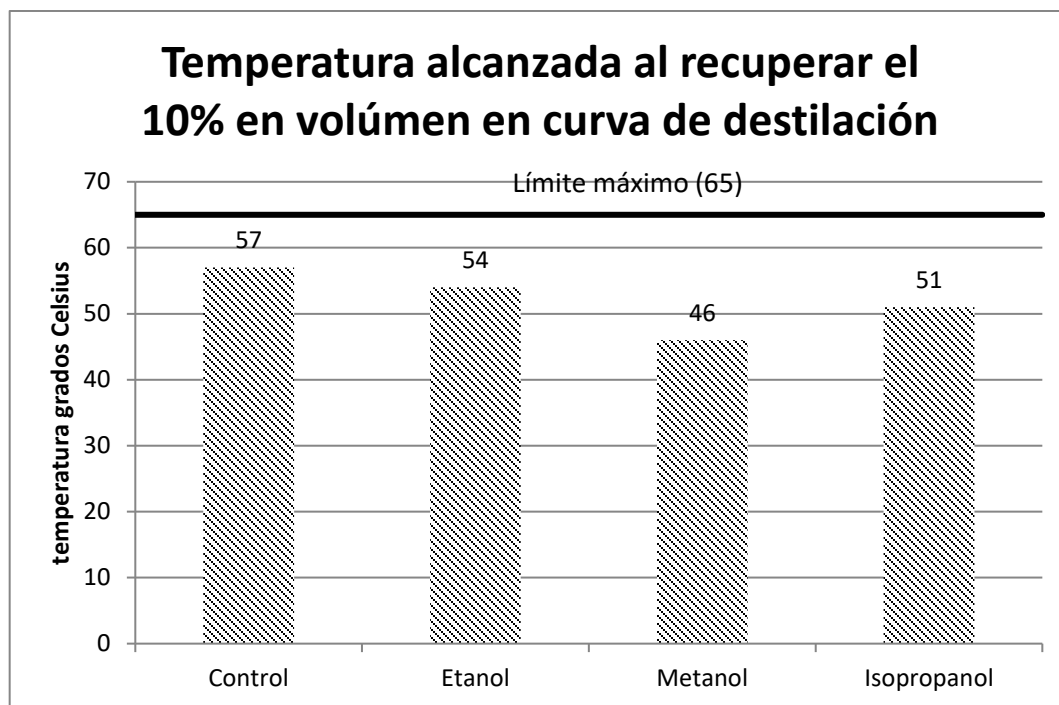
Figura 5. Corrosión de tira de cobre de las mezclas y control



Fuente: elaboración propia.

Comportamiento de la prueba curva de destilación al recuperarse el 10 % en volumen de la muestra a destilar de la muestra control y las mezclas al 10 % en volumen de etanol, metanol e isopropanol.

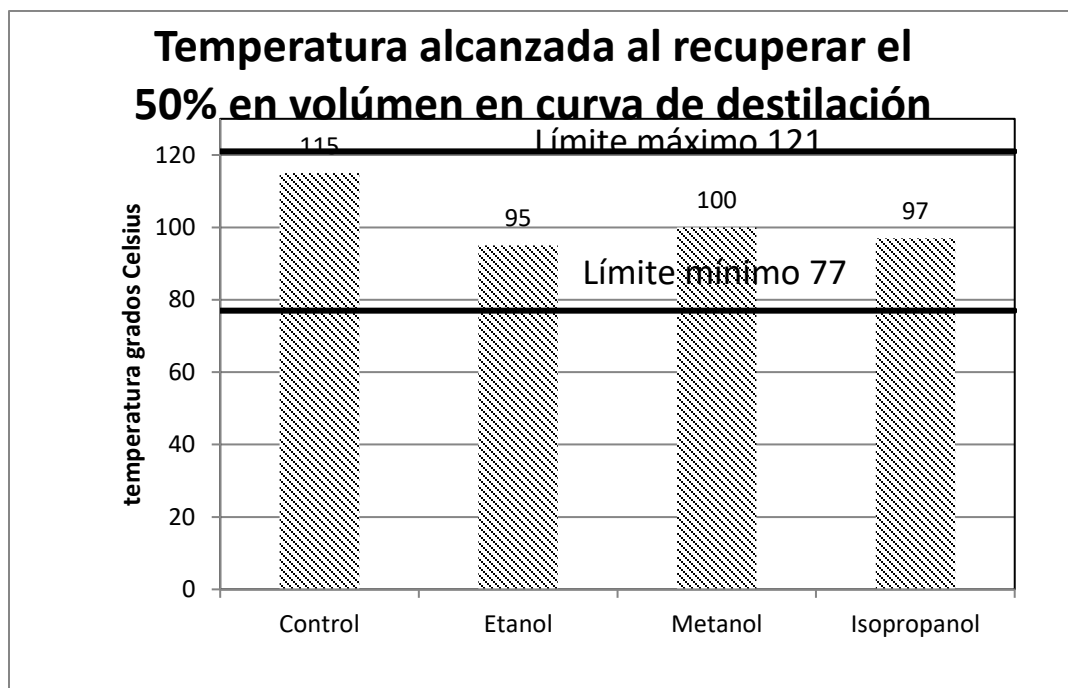
Figura 6. **Temperatura al recuperar el 10 % en volumen de la prueba
curva de destilación**



Fuente: elaboración propia.

Comportamiento de la prueba curva de destilación al recuperarse el 50 % en volumen de la muestra a destilar de la muestra control y las mezclas al 10 % en volumen de etanol, metanol e isopropanol.

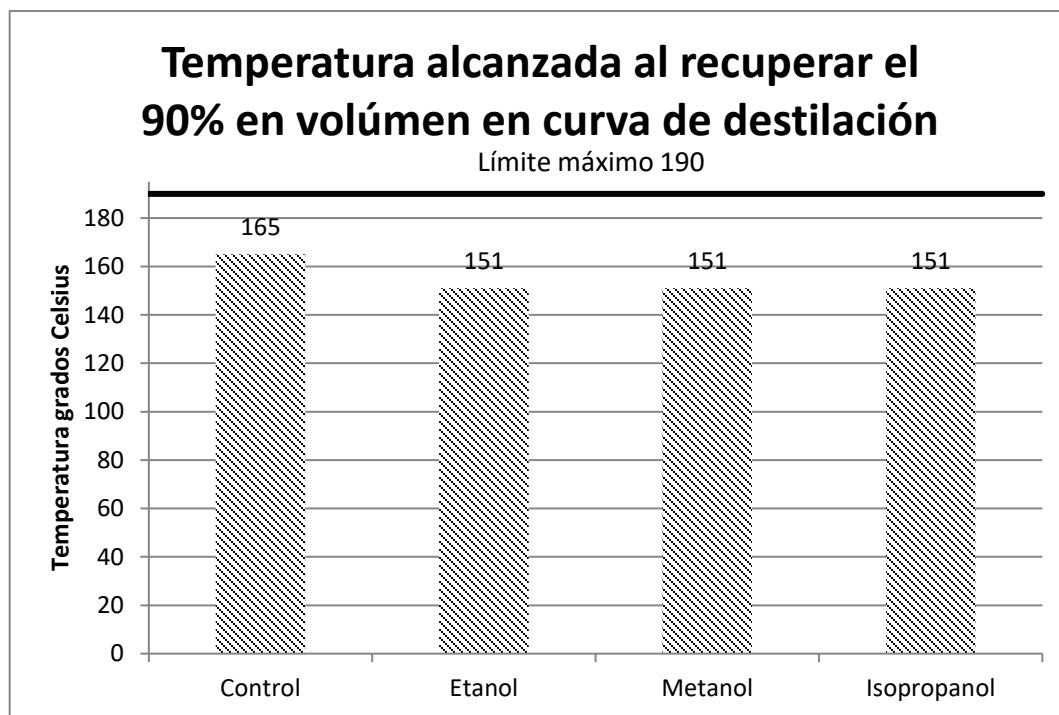
Figura 7. **Temperatura al recuperar el 50 % en volumen de la prueba
curva de destilación**



Fuente: elaboración propia .

Comportamiento de la prueba curva de destilación al recuperarse el 90 % en volumen de la muestra a destilar de la muestra control y las mezclas al 10 % en volumen de etanol, metanol e isopropanol.

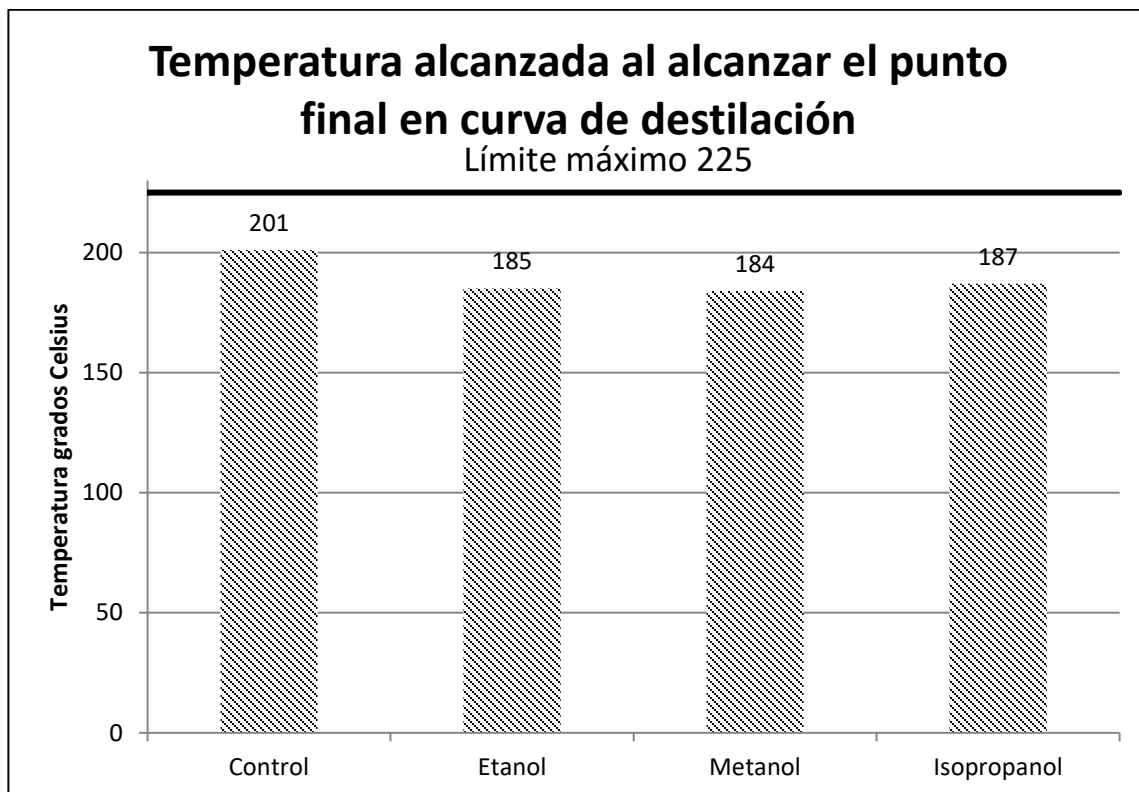
Figura 8. **Temperatura al recuperar el 90 % en volumen de la prueba
curva de destilación**



Fuente: elaboración propia.

Comportamiento de la prueba curva de destilación al alcanzar el punto final de la muestra a destilar de la muestra control y las mezclas al 10 % en volumen de etanol, metanol e isopropanol.

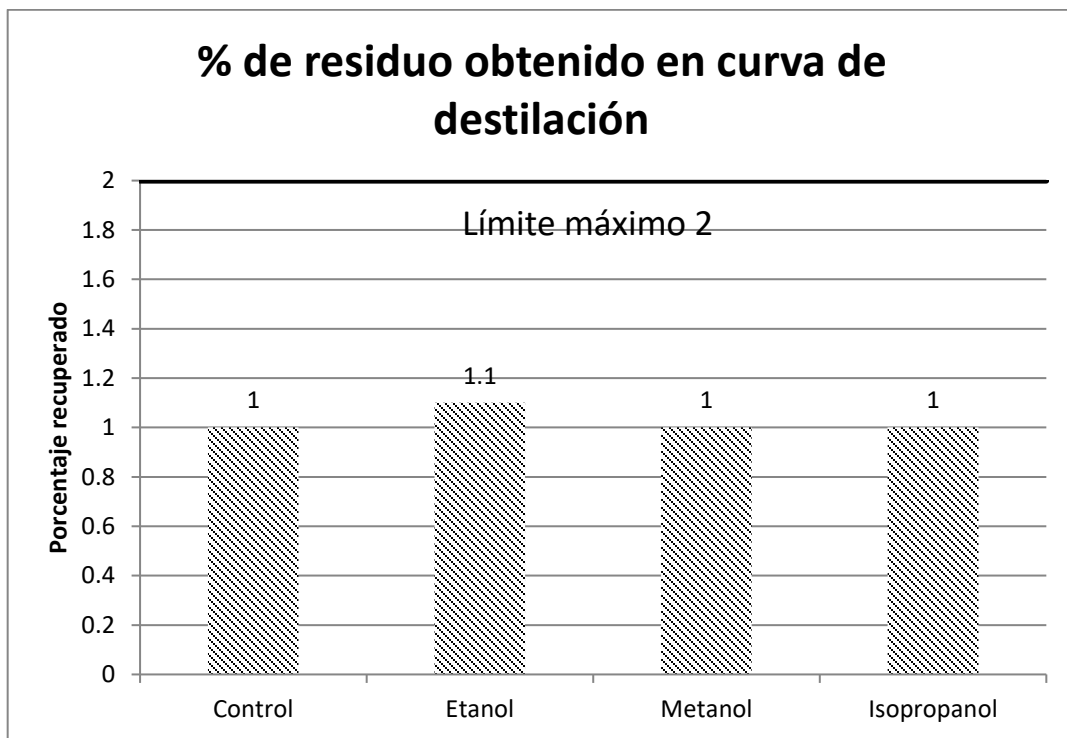
Figura 9. Temperatura al punto final de la prueba curva de destilación



Fuente: elaboración propia.

Comportamiento de la prueba curva de destilación al determinar el residuo de la muestra a destilar de la muestra control y las mezclas al 10 % en volumen de etanol, metanol e isopropanol.

Figura 10. **Residuo de la prueba curva de destilación**

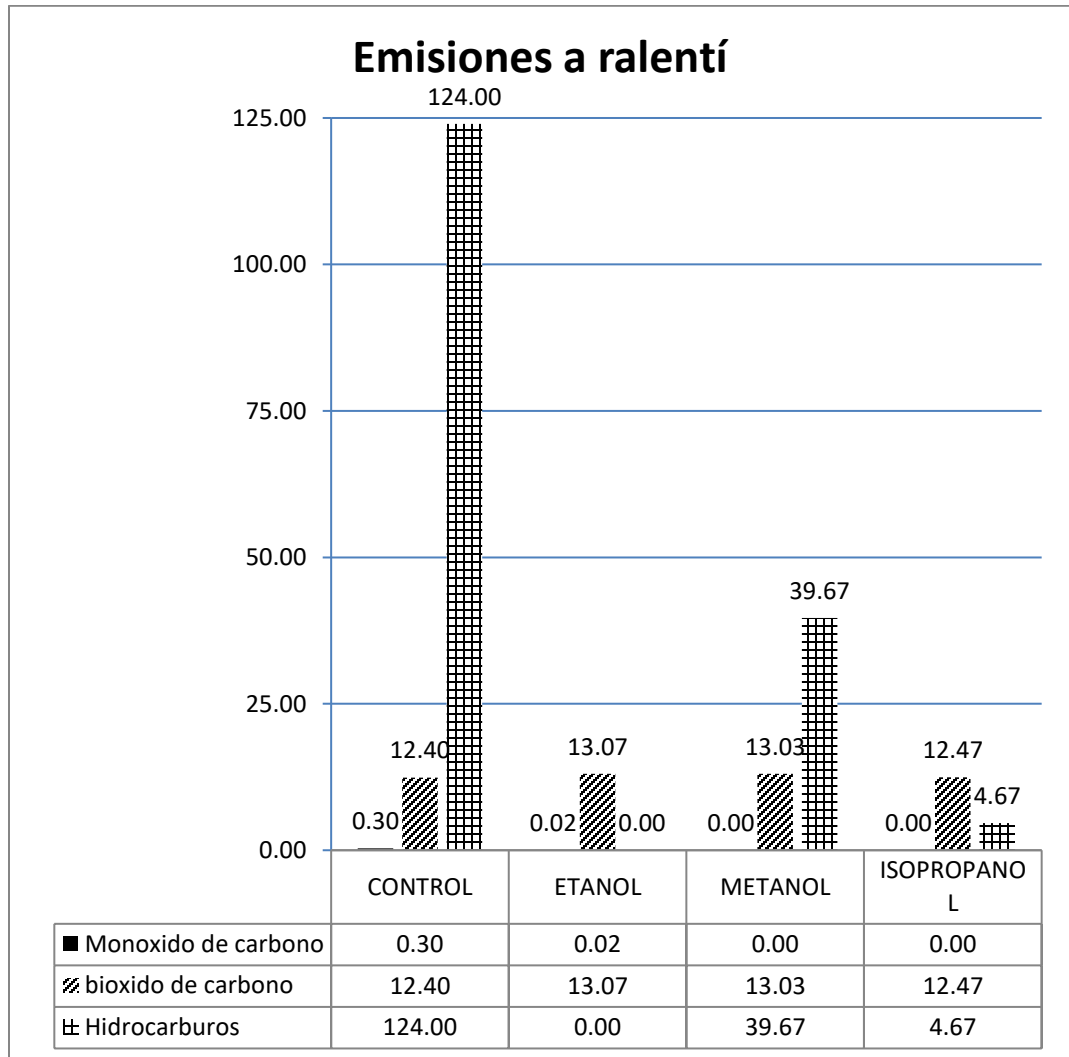


Fuente: elaboración propia.

3.2. **Ensayo de combustión**

Gases de combustión generados por la muestra control y las mezclas al 10 % en volumen de etanol, metanol e isopropanol a ralentí.

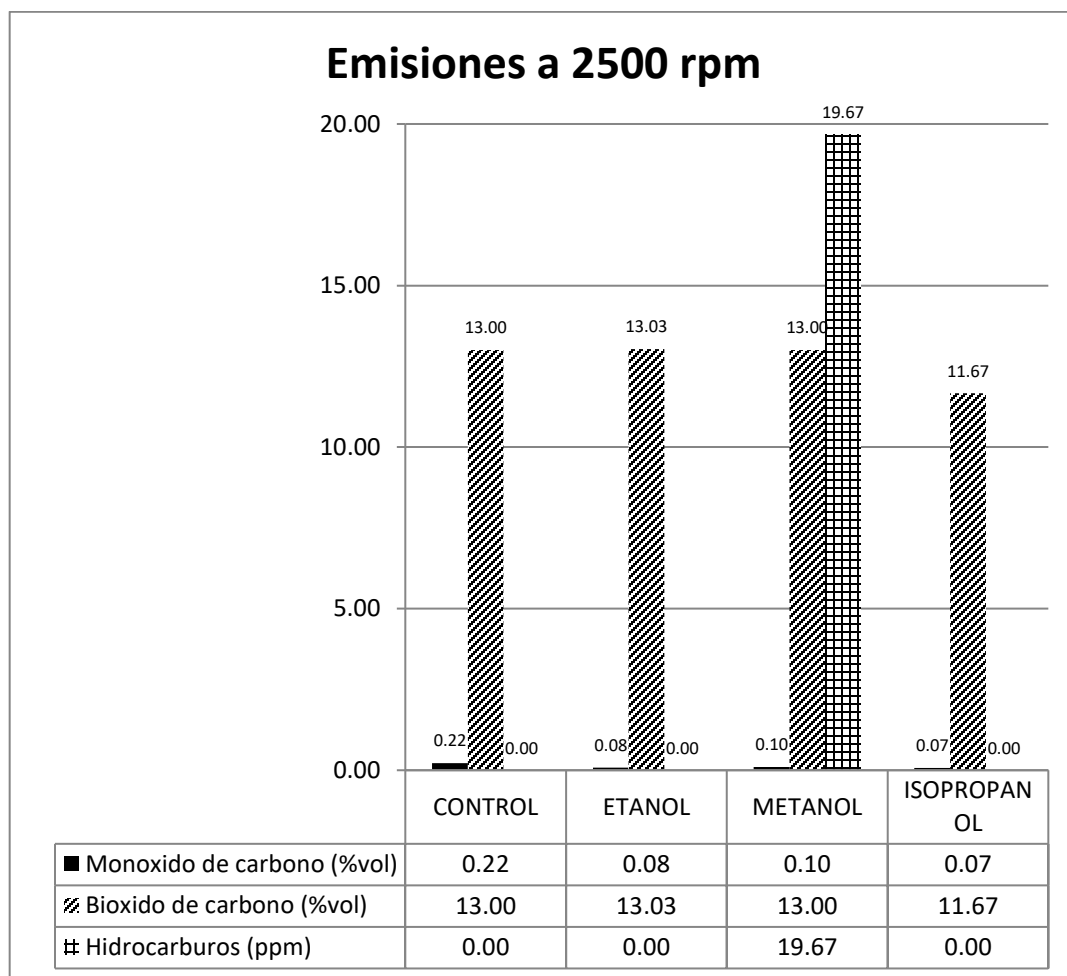
Figura 11. Emisiones a ralentí



Fuente: elaboración propia .

Gases de combustión generados por la muestra control y las mezclas al 10 % en volumen de etanol, metanol e isopropanol a 2500 rpm.

Figura 12. Emisiones a 2500 rpm

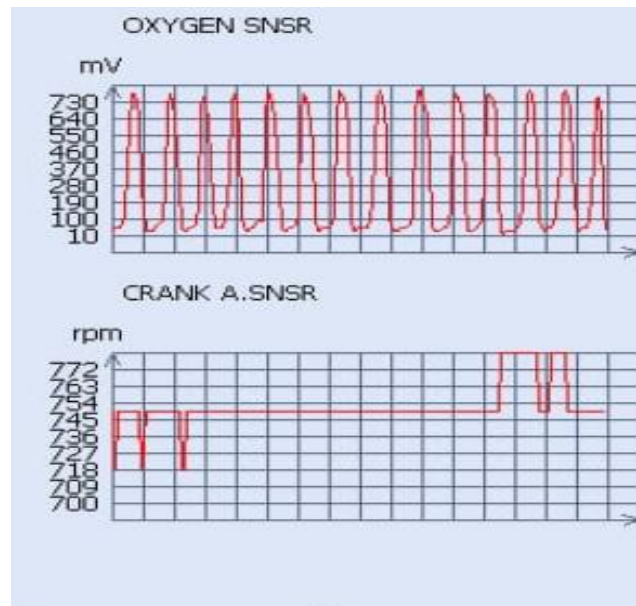


Fuente: elaboración propia.

3.3. Funcionamiento del sensor de oxígeno

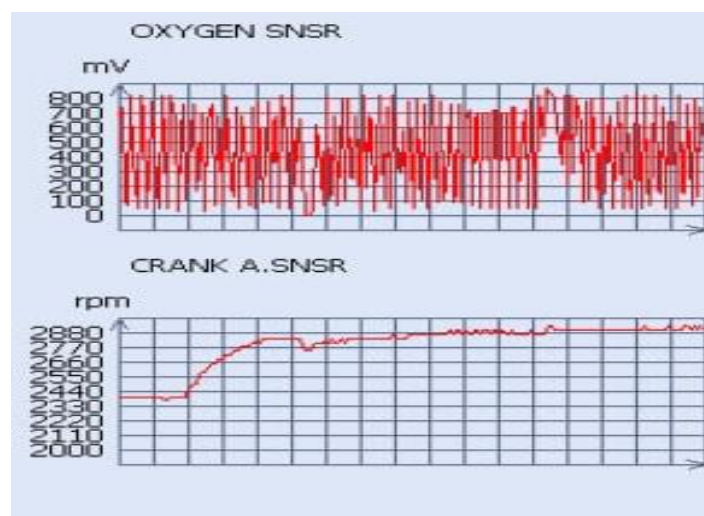
Las siguientes figuras corresponden al funcionamiento del sensor de oxígeno del vehículo al utilizar la muestra control a ralentí y 2500 rpm.

Figura 13. **Funcionamiento del sensor a ralentí con control**



Fuente: elaboración propia.

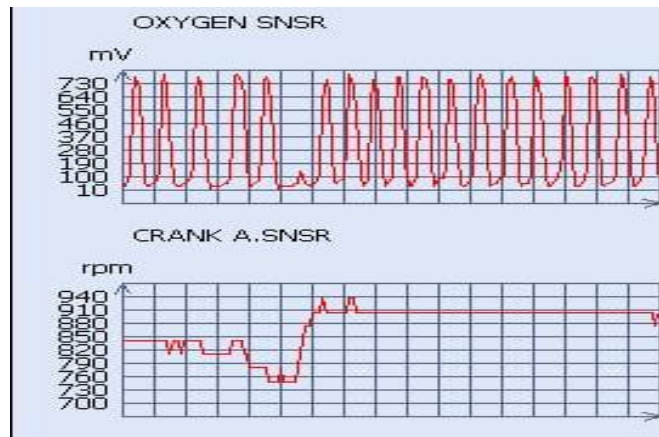
Figura 14. **Funcionamiento del sensor a 2500 rpm con control**



Fuente: elaboración propia.

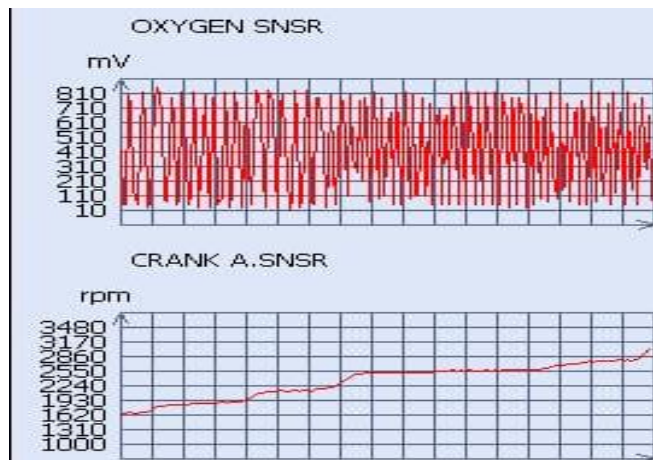
Las siguientes figuras corresponden al funcionamiento del sensor de oxígeno del vehículo al utilizar la mezcla al 10 % en volumen de etanol a ralentí y 2500 rpm.

Figura 15. **Funcionamiento del sensor a ralentí con mezcla de etanol**



Fuente: elaboración propia.

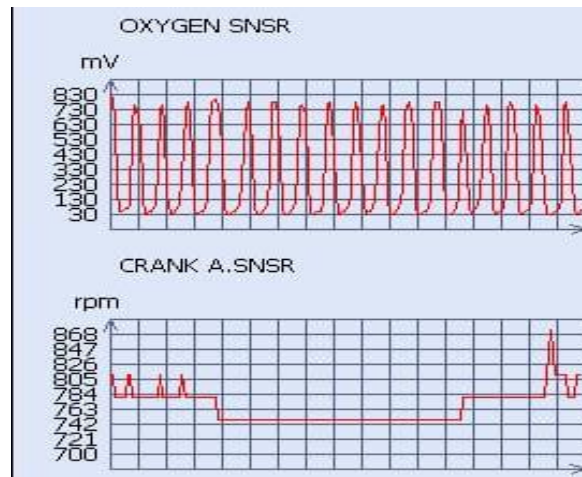
Figura 16. **Funcionamiento del sensor a 2500 rpm con mezcla de etanol**



Fuente: elaboración propia.

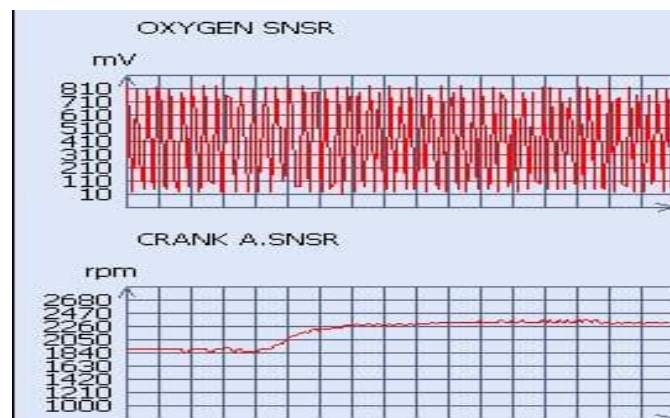
Las siguientes figuras corresponden al funcionamiento del sensor de oxígeno del vehículo al utilizar la mezcla al 10 % en volumen de metanol a ralentí y 2500 rpm.

Figura 17. **Funcionamiento del sensor a ralentí con mezcla de metanol**



Fuente: elaboración propia.

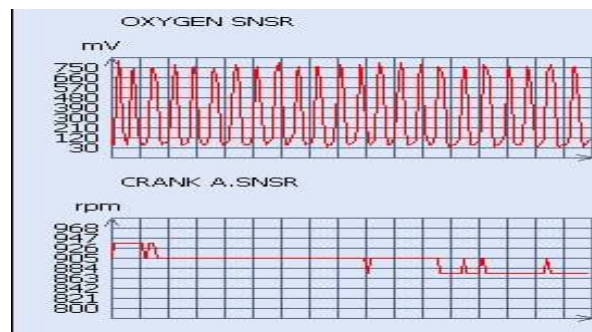
Figura 18. **Funcionamiento del sensor a 2500 rpm con metanol**



Fuente: elaboración propia.

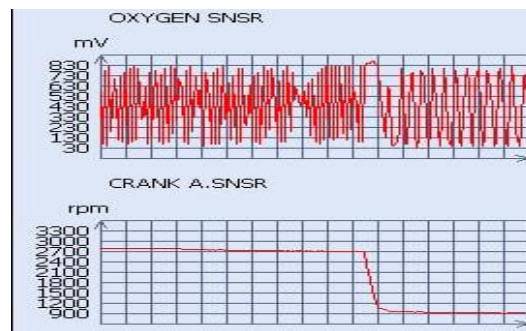
Las siguientes figuras corresponden al funcionamiento del sensor de oxígeno del vehículo al utilizar la mezcla al 10 % en volumen de isopropanol a ralentí y 2500 rpm.

Figura 19. **Funcionamiento del sensor a ralentí con mezcla de isopropanol**



Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Funcionamiento del sensor a 2500 rpm con mezcla de isopropanol**



Fuente: elaboración propia.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se evaluaron las propiedades fisicoquímicas de las distintas mezclas para establecer su conformidad con los parámetros de calidad definidos para la gasolina superior por el Reglamento técnico centroamericano RTCA.75.01.20:04. La mezcla gasolina/ metanol fue la única que no cumplió por elevar demasiado la presión de vapor de Reid. A continuación, se analiza cada propiedad a detalle.

4.1. Octanaje

La gasolina superior debe tener por lo menos un valor de índice de octano de 89, todas las mezclas incrementaron el octanaje siendo, las mezclas con etanol e isopropanol las que dieron los mejores resultados. El incremento producido en el índice de octano en las mezclas es beneficioso por ayudar a generar una mejor combustión y reducir el golpeteo. La figura 3 del apartado de resultados se muestra el comportamiento del índice de octano de todas las mezclas de gasolina y alcohol al 10 % versus el control.

4.2. Presión de vapor de Reid

El Reglamento técnico centroamericano RTCA.75.01.20:04 para la gasolina superior establece un valor máximo de 69 kilo pascales, la mezcla gasolina/metanol incremento esta propiedad en 12 unidades por encima del máximo permitido, por lo que no se recomienda su uso por generar muchos compuestos volátiles que se volatilizaran al ambiente. Las mezclas gasolina/etanol y gasolina/isopropanol también incrementaron la presión de

vapor de reíd en relación con el control sin exceder el límite máximo permitido. Un incremento en la presión de vapor se relaciona con un mejor encendido en frío y un incremento en las emisiones de componentes orgánicos volátiles (VOC) responsables del problema del ozono urbano, razón por la cual se regula el valor máximo de la presión de vapor de Reid (Bair, 2001).

Las mezclas gasolina/ etanol y gasolina/isopropanol ayudarían a mejorar el arranque en frío, pero aumentarían las emisiones de componentes orgánicos volátiles (VOC) respecto al control. El aumento de la presión de vapor de reíd en las distintas mezclas de gasolina y alcohol puede entenderse que a medida que se añade alcohol a una gasolina pura se incrementara la presión de vapor de reíd ya que el alcohol se comporta como un hidrocarburo de bajo peso molecular (Bair, 2001).

La figura 4 del apartado de resultados muestra el comportamiento de la presión de vapor de reíd de todas las mezclas de gasolina y alcohol al 10 % versus el control.

4.3. Corrosión de tira de cobre

El Reglamento técnico centroamericano RTCA.75.01.20:04 para la gasolina superior establece un valor máximo de 1 para esta característica, las mezclas gasolina/etanol, gasolina/metanol y gasolina/isopropanol no modificaron esta propiedad en relación con el control. La figura 5 del apartado de resultados muestra el comportamiento de la corrosión de tira de cobre de todas las mezclas de gasolina y alcohol al 10 % versus el control.

4.4. Curva de destilación

Las siguientes figuras corresponden a los porcentajes recuperados de la curva de destilación.

4.4.1. Temperatura alcanzada al recuperar el 10 % en volumen

El Reglamento técnico centroamericano RTCA.75.01.20:04 para la gasolina superior establece una temperatura máxima de 65 grados Celsius en la prueba curva de destilación, al recuperar el 10 % del volumen de la muestra. Todas las mezclas de gasolina/alcohol redujeron la temperatura a la cual se recuperó el 10 % en volumen de la muestra, cumpliendo así lo establecido por el reglamento citado, la reducción de la temperatura en esta prueba se debe al bajo punto de ebullición del etanol, metanol e isopropanol evaporándose más rápidamente que otras fracciones de la gasolina control. La figura 6 del apartado de resultados muestra el comportamiento de este parámetro, de todas las mezclas de gasolina y alcohol al 10 % versus el control.

4.4.2. Temperatura alcanzada al recuperar el 50 % en volumen

El Reglamento técnico centroamericano RTCA.75.01.20:04 establece una temperatura mínima de 77 grados Celsius y una temperatura máxima de 121 grados Celsius en la prueba de curva de destilación al recuperarse el 50 % del volumen de la muestra. Todas las mezclas presentaron una menor temperatura en relación con el control, dado que los alcoholes ensayados tienen puntos de ebullición por debajo de este rango de temperaturas

Todas las mezclas cumplieron lo establecido en el Reglamento técnico centroamericano para una gasolina superior respecto a este parámetro. La figura

7 del apartado de resultados muestra el comportamiento de este parámetro, de todas las mezclas de gasolina y alcohol al 10 % versus el control.

4.4.3. Temperatura al recuperar el 90 % en volumen

El reglamento técnico centroamericano RTCA.75.01.20:04 establece una temperatura máxima de 190 grados Celsius en la prueba curva de destilación, al recuperarse el 90 % del volumen de la muestra. Todas las mezclas redujeron la temperatura de este parámetro en la misma magnitud, por tener los alcoholes ensayados bajos puntos de ebullición permitiendo una más rápida destilación de estos. Todas las mezclas cumplieron las exigencias de calidad de este parámetro. La figura 6 del apartado de resultados muestra el comportamiento de este parámetro, de todas las mezclas de gasolina y alcohol al 10 % versus el control.

4.4.4. Temperatura alcanzada en el punto final de destilación

El Reglamento técnico centroamericano RTCA.75.01.20:04 establece una temperatura máxima de 225 grados Celsius en la prueba curva de destilación, al alcanzar el punto final. Para todas las mezclas ensayadas se observó una variación similar, esto supone que al alcanzar esta temperatura los alcoholes ya se habían volatilizado, no existiendo ningún elemento diferenciador entre todas las mezclas, todos los alcoholes incrementaron la fracción liviana de la gasolina razón por la cual todas las temperaturas de la prueba de la curva de destilación presentaron valores por debajo del control. La figura 7 del apartado de resultados muestra el comportamiento de este parámetro, de todas las mezclas de gasolina y alcohol al 10 % versus el control.

4.4.5. Residuo de la curva de destilación

La legislación guatemalteca establece un porcentaje de residuo máximo de 2 % para la prueba de curva de destilación. Todas las mezclas presentaron resultados similares, esto dado que los alcoholes son componentes volátiles no afectaron los compuestos pesados de la gasolina superior utilizada como control.

4.4.6. Evaluación de las emisiones

Se realizaron evaluaciones de las emisiones de monóxido de carbono, dióxido de carbono e hidrocarburos no quemados a ralentí y a 2500 rpm. A través de un análisis de varianza se determinó si existía diferencia significativa entre las emisiones generadas por las mezclas y el control, encontrándose lo siguiente:

Tabla XII. **Diferencias significativas de las distintas emisiones a ralentí**

Prueba a ralentí		
Contaminante	Existe diferencia significativa entre las mezclas y control	Nivel de confianza
Monóxido de carbono	Sí	95 %
Dióxido de carbono	No	95 %
Hidrocarburos	Sí	95 %

Fuente: elaboración propia.

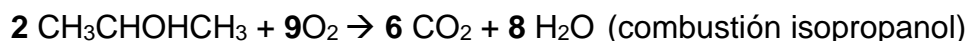
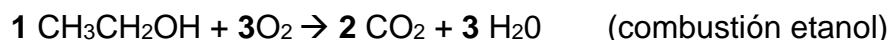
Tabla XIII. **Diferencias significativas de las distintas emisiones a 2500 rpm**

Prueba a 2500 rpm		
Contaminante	Existe diferencia significativa entre las mezclas y el control	Nivel de confianza
Monóxido de carbono	Si	95 %
Bióxido de carbono	Sí	95 %
Hidrocarburos	No	95 %

Fuente: elaboración propia.

Las emisiones de monóxido de carbono tanto a ralentí como a 2500 rpm se redujeron para todas las mezclas respecto al control, las figuras 11 y 12 muestran esta tendencia, todas las mezclas mostraron similar potencial para reducir esta emisión.

Las emisiones de bióxido de carbono a ralentí se incrementaron, lo cual es signo que existe una mejor combustión de la gasolina al ser aditivada con alcoholes; la mezcla de etanol fue la que generó mayor cantidad de emisiones. A altas revoluciones (2500 rpm) no existió una apreciable diferencia entre el control y las mezclas de gasolina/ etanol y gasolina/isopropanol, que es la mezcla gasolina/ etanol la que generó la mayor cantidad de emisiones de bióxido de carbono. Las reacciones de combustión de los alcoholes se presentan a continuación.



A altas revoluciones se observó que las emisiones de bióxido de carbono entre el control y las mezclas de gasolina/etanol y gasolina/metanol eran similares lo que significa que a altas revoluciones el vehículo es capaz mejorar por si solo las condiciones de combustión, lo cual fue ratificado dado que a estas revoluciones la cantidad de hidrocarburos no quemados fue de cero en la muestra control.

Las emisiones de hidrocarburos no quemados a ralentí se vieron reducidas significativamente con las mezclas de alcoholes, siendo la mezcla gasolina / etanol la que logro reducir a cero estas emisiones, a altas revoluciones (2500 rpm) no se lograron beneficios dado que la muestra control como las mezclas de gasolina/etanol y gasolina/isopropanol logró cero emisiones.

Las mezclas de gasolina con alcohol permitieron reducir las emisiones de monóxido de carbono e incrementar las emisiones de bióxido de carbono, así reducir las emisiones de los hidrocarburos no quemados a ralentí.

4.4.7. Funcionamiento del sensor de oxígeno

De forma simultánea se realizó el monitoreo del funcionamiento del sensor de oxígeno y las emisiones de gases de escape, observándose que al lograr su correcto funcionamiento el sensor de oxígeno se estabilizan los valores de las emisiones, razón de ello es que los datos de las emisiones deben tomarse hasta que se estabilicen las lecturas de las emisiones o en su defecto el funcionamiento del sensor de oxígeno.

Se sabe que la función del sensor de oxígeno es detectar la concentración de oxígeno en los gases de escape y con esta información el control inteligente del vehículo, corrige la inyección de combustible para no tener una mezcla pobre

o rica si no estequiometricamente correcta y que al detectar una baja concentración de oxígeno en los gases de escape producto de una mezcla rica en combustible se produce un pulso eléctrico mayor a 0.45 volts y por el contrario si se tiene una mezcla pobre en combustible y con mucho oxígeno disponible, el oxígeno residual no quemado presente en los gases de escape inducirá al sensor de oxígeno a producir un pulso eléctrico menor de 0.45 volts. Las figuras del 13 al 20 muestran el funcionamiento del sensor de oxígeno al estabilizarse.

CONCLUSIONES

1. Utilizar una mezcla de 10 % en volumen de etanol o isopropanol permite reducir de forma significativa las emisiones de monóxido de carbono e hidrocarburos no quemados y para que dicha ganancia sea efectiva el vehículo debe estar afinado.
2. Para realizar una correcta medición de emisiones se debe ajustar el vehículo a los parámetros de fábrica, calibrar el equipo detector de emisiones y monitorear por medio de un scanner el funcionamiento de los sensores del vehículo durante la medición.
3. La mezcla 90 % de gasolina y 10 % de metanol en volumen no cumple con el requisito de presión de vapor de reíd establecido en el Reglamento técnico centroamericano para la gasolina superior RTCA 75.01.20:04, por lo que no se recomienda su implementación.
4. Las mezclas con 10 % en volumen de etanol e isopropanol en volumen cumplen con los requisitos de calidad establecidos Reglamento técnico centroamericano para la gasolina superior RTCA 75.01.20:04.
5. El agregar hasta un 10 % en volumen de etanol o isopropanol a la gasolina superior que se comercializa en Guatemala permite reducir las emisiones de monóxido de carbón e hidrocarburos no quemados.

RECOMENDACIONES

1. Proponer a los entes gubernamentales que exijan a los importadores de combustible utilizar alcoholes como mejoradores de octanaje en sustitución de compuestos tales como MTBE o compuestos aromáticos que son altamente perjudiciales para la salud.
2. Evaluar la variante tecnológica de los vehículos y su influencia en reducir las emisiones contaminantes y establecer que dispositivos mínimos deberían de poseer los vehículos importados al país.
3. Proponer ante los entes gubernamentales eliminar o reducir los aranceles de los sensores de oxígeno y catalizadores de los vehículos, para que sea más accesible económicamente afinar un vehículo a los parámetros establecidos por el derogado reglamento para el control de emisiones de los vehículos automotores, Acuerdo Gubernativo número 14-97, toda vez que estos actualmente tienen un costo aproximado de Q4000 y Q2000.
4. Evaluar el comportamiento de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (VOC) al utilizar estos alcoholes dado su probable aumento derivado al aumento de la presión de vapor de Reid que estos generan.
5. Evaluar el comportamiento de las mermas por evaporación en una gasolinera que almacene gasolina aditivada con estos alcoholes, dado a que se infiere un aumento de estas por el aumento de la presión de vapor de Reid y si es posible lograr el cumplimiento del parámetro para mermas

establecido en la norma API 1621: control de inventarios de líquidos a granel en mercados al por menor.

REFERENCIAS

1. *Acuerdo gubernativo 14-97. Reglamento para control de emisiones de vehículos automotores.* 04 de febrero de 1997.
2. Ministerio de Energía y Minas. *Acuerdo Ministerial 303-2018 Nómina de productos petroleros con sus respectivas denominaciones, características, y especificaciones de calidad.* 9 de noviembre de 2018.
3. Aroche, C. (2013). *Impacto de las emisiones contaminantes del parque vehicular en la calidad del aire del campus central de la Universidad de San Carlos.* (Tesis de Licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala: Guatemala.
4. Asociación de Combustibles Renovables Guatemala. (s.f.). *Etanol.* Recuperado de <http://acrguatemala.com/etanol/>
5. Bair, C. (2001). *Química ambiental* (2 ed.). España: Reverté.
6. Cann, M. (2012). *Química ambiental* (2 ed.). España: Reverté.
7. COGUANOR, CONACYT, MIFIC, SIC, MEIC. (s.f.). *Producto del petróleo gasolina superior especificaciones. reglamento técnico centroameicano, rtca 75. RTCA 75.01.20:04.*
8. Córdoba, J. (s.f.). *Estudio del efecto de la altitud sobre un motor de automoción operando con mezcla de gasolina y bioetanol.* Colombia: Recuperado de: <http://blade1.uniquindio.edu.co/uniquindio/eventos/siquia/siquia2009pon8.pdf>.

9. Dickson, T. (1983). *Química enfoque ecologico*. Mexico: Limusa.
10. Etanol. (s.f.). *Wikipedia*. Recuperado de <https://es.wikipedia.org/wiki/Etanol>.
11. Gonzalez, L. (2010). *Análisis comparativo de la generación de potencia y emisiones de un motor de combustión interna alimentado por gasolina y con la instalación de una celda electrolítica* (Tesis de Licenciatura). Universidad del Valle de Guatemala: Guatemala.
12. Horta, L. (2004). *Perspectivas de un programa de biocombustibles en America Central*. Recuperado de <http://www.acrguatemala.com/pdf/perspectivas-biocombustibles-en-CA.pdf>.
13. INTECAP. (2004). *Control de emisión de gases en motores a gasolina. Guatemala*.
14. Kirk, R. (1998). *Enciclopedia de Tecnología Química*. México: Limusa.
15. Klingenberg, H. (1996). *Automotive exhaust emission testing*. Alemania: Springer.
16. Lara, M. (2013). *Diseño de la investigación de determinación de las mezclas optimas de etanol anhidro en gasolina y biodiesel en aceite combustible diésel, para el uso en el transporte, en base a las especificaciones legales de calidad* (Tesis de Licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala: Guatemala.
17. Oliva, P. (2008). *Calidad del aire en Guatemala: Compilación de la información existente* (Tesis de Maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala: Guatemala.

18. Oliva, P. (2017). *Informe anual de la calidad del aire ciudad de Guatemala 2016*.
19. Oliva, P. (2017). *Informe anual de la calidad del aire de la ciudad de Guatemala 2016*. Recuperado de <http://aireguate.blogspot.com/2017/07/informe-lma-2016.html>.
20. Oliva, P. (s.f.). Calidad del aire en la ciudad de Guatemala. *Revista Científica*. Recuperado de <http://www.revistasguatemala.usac.edu.gt/index.php/qyf/article/view/385/pdf>.
21. Ortuño, A. (1994). *Introducción a la Química Industrial* (2da ed.). España: Reverte.
22. Parkash, S. (2010). *Petroleum fuel manufacturing handbook*. Estados Unidos: MacGraw-Hill Companies Corporation.
23. Sher, E. (1998). *Handbook of air pollution from internal combustion engine*. Estados Unidos: Academic press limited.
24. Spiro, T. (2005). *Química medioambiental* (2da. ed.). España: Prentice Hall.
25. Wark, K. (s.f.). *Contaminación del aire origen y control*. 1990, Mexico: Limusa.